



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA ŽEBRA KŘÍDLA

PRODUCTION OF WING RIB

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Ivančo

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Radek Ivančo</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Michaela Císařová, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Výroba žebra křídla

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V práci je zpracován postup výroby žebra náběžné hrany křídla letounu SportStar RTC z hliníkového plechu. Polotovar žebra bude vystřížen technologií přesného střihání a následně olemován.

### Cíle diplomové práce:

- Provést rozbor možných technologií výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- vypracování literární studie na vybrané technologie výroby,
- zpracování návrhu technologického postupu výroby součásti, doplněného technologickými a kontrolními výpočty.
- návrh a popis sestavy nástroje a lisovacího stroje, včetně výkresové dokumentace,
- provést technicko–ekonomické hodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

VALBERG, S. Henry. Applied Metal Forming: Including FEM analysis. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-51823-9.

TSCHATSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 35-403-3216-2.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design: processes - machines - tools. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2006. ISBN 00-714-6271-6.

GUILDI, Alfons. Přistřihování a přesné střihání. Praha: SNTL, 1969. ISBN 04-209-69.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. Stříhání a další způsoby dělení materiálů. Praha: SNTL, 1980. ISBN 04-234-80.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

IVANČO Radek: Výroba žebra křídla

---

Práce předkládá návrh výroby lisovaného dílu z hliníkové slitiny skupiny 2024 (dural). Na základě vypracované teoretické studie a požadavku firmy, byl navržen střížný nástroj se zaoblenou hranou pro vystřížení rozvinutého tvaru výlisku na výstředníkovém lisu LEN 40 C. Pro vylisování tvaru byl navržen nový nástroj z textitové hmoty pro kapalinový lis Quintus QFC. Komponenty střížného nástroje byly navrženy především z normalizovaných (nakoupených) dílů. Vyráběný střížník a střížnice jsou navrženy z běžně dostupných nástrojových ocelí a zapracovány na přiložených výkresech. Výsledkem práce je doporučení investice do specializovaného pracoviště výroby rozvinutého tvaru a snížení pracnosti úprav po lisování lemů.

Klíčová slova: stříhání, lisování, hliník, lem, ohýbání

## **ABSTRACT**

IVANČO Radek: Production of wing rib

---

The thesis presents a proposal of production of a molded part from the aluminum alloy of group 2024 (dural). Based on the theoretical study and the requirements of the company was designed a cutting tool with a rounded edge for cutting the unfolded shape of the part on the eccentric press LEN 40 C. A new forming tool from textite material for fluid press Quintus QFC was designed. The parts of the cutting tool were designed primarily from normalized (purchased) parts. Manufactured punch and shearing die are made of commonly available tool steels and processed on the attached drawings. The result of the thesis is a recommendation to invest in a specialized workplace for the production of a unfolded shape and reduction of laboriousness adjusting after forming.

Keywords: shearing, pressing, aluminum, flange, bending

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

IVANČO, Radek. *Výroba žebra křídla*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113034>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucí diplomové práce.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji paní Ing. Michaelle Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se realizace diplomové práce. Dále děkuji firmě za poskytnutí dokumentace reálného dílce. Závěrem děkuji své rodině za psychickou podporu během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

<b>ÚVOD</b>	9
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b>	10
1.1 Možné varianty výroby rozvinutého tvaru a lemů	13
<b>2 STŘÍHÁNÍ, OHÝBÁNÍ A LISOVÁNÍ</b>	18
2.1 Stříhání	18
2.1.1 Popis operace stříhání ve stříhadlech	18
2.1.2 Výpočet střížné síly, práce a vůle	22
2.1.3 Základní sestava střížného nástroje	23
2.1.4 Určení polohy upínací stopky	26
2.2 Stříhání se zvýšenou přesností	27
2.2.1 Stříhání s nátlacnou a zaoblenou hranou	28
2.2.2 Stříhání se zkoseným přidržovačem, přistřihování a kalibrace otvorů	30
2.3 Ohýbání	31
2.3.1 Maximální a minimální poloměr ohybu	32
2.3.2 Výpočet rozvinutí ohybu a stanovení odpružení	33
2.3.3 Ohýbání - lemování	35
2.4 Metody výroby lemů a prolisů	37
2.4.1 Metoda Guerin	37
2.4.2 Metoda Wheelon	39
2.4.3 Metoda Triform	40
2.4.4 Metoda Marform	41
<b>3 NÁVRH ŘEŠENÍ VÝROBY</b>	42
3.1 Technologičnost konstrukce a postup výroby dílu	42
3.2 Návrh rozložení výstřížků na plechu a nástřihového plánu	44
3.3 Výpočet střížné síly a práce, specifikace lisu	49
3.4 Určení polohy stopky	51
3.5 Popis střížného nástroje a kontrola nejmenšího střížníku	52
3.6 Lisování lemů	56
<b>4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ</b>	59
<b>5 ZÁVĚRY</b>	60

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam výkresů

Seznam příloh



## ÚVOD

Letecký průmysl se od první poloviny 20. století značně rozvinul a zdokonalil. Začali se klást vysoké nároky na jakost použitých materiálů a pečlivost při výrobě dílů. Se zvyšující se sériovostí výroby se rovněž začalo zvyšovat množství dílů potřebných nejen pro výrobu nových leteckých sestav, ale rovněž pro pravidelnou údržbu letadel po splnění maximálního počtu letových hodin.

V oblasti letectví se kvůli snižování hmotnosti konstrukce při zachování poměrně vysoké pevnosti vyskytuje převážné množství tvářených dílců z hliníkových slitin tepelně zpracovaných rozpouštěcím žiháním. Z oblasti tváření je zastoupeno velké množství běžných i speciálních technologií především tváření s využitím nepevného nástroje – pryže či kapaliny. Při tvorbě rozvinutých tvarů zde nesmí docházet k tepelnému či příliš velkému abrazivnímu ovlivnění řezných ploch. Proto se používá nejčastěji frézování nebo stříhání. Lisovací nářadí leteckého průmyslu je díky využití nepevného nástroje spíše jednoduššího charakteru (tažník s fixačními díly). Ve zmíněné oblasti výroby se v dnešní době lze setkat již i s tvářecími nástroji, tištěných z pevných a tvrdých polymerů metodou 3D tisku. Jednoduchost tvářecích nástrojů v letectví lze opodstatnit nízkou sériovostí výroby. Z hlediska technologie však vysoké náklady představuje stavba velkých montážních přípravků pro výrobu jednotlivých nýtovaných podsestav, které musí zaručit nejen vyměnitelnost vyráběných celků (obr. 1), ale rovněž co největší tvarové přiblížení matematické ploše letadla.



Obr. 1 Zobrazení struktury letadla [3]

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [4], [5], [6], [7], [8], [10]

Jedná se o součást z plechu o síle 0,5 mm z hliníkové slitiny 2024 Al-Clad (viz tab. 1 a 2) ve finálním stavu tepelně zpracovaném na stav T3 (výchozí materiál je ve stavu „O“ - žíhaný na měkko). Dílec slouží jako náběžné žebro křídla (viz obr. 2) letounu SportStar RTC certifikovaného dle přísné evropské směrnice EASA. Žebro je ve finální sestavě spojeno s nosníkem křídla a potahovým plechem za pomoci nýtů. Otvory pro nýty bývají zhotoveny až při ručním sestavování na rozměření, proto na ně nebude brán ohled při výrobě dílce. Zvolený typ žebra se používá na obou stranách křídla – vyrábí se v levém i pravém provedení. Finální produkt je chemicky zpracován eloxováním a stříkán zelenou barvou. Roční dodávka letadel činí v průměru 45 kusů. Letoun je dodáván převážně do Ameriky a Asie. Zvolený typ křídla nemá příliš proměnlivou geometrii, a proto lze zvolený typ žebra použít ve větším rozsahu náběžné hrany (obr. 3). Každé křídlo obsahuje 8 ks zmíněných žeber. Celkem tedy je na každém letadle použito 16 ks stejných žeber. Minimální roční spotřeba žeber je tedy 720 ks. Firma však dodává nejen hotová letadla, ale rovněž samostatná křídla, která jsou navržena tak, aby byla zaručena vyměnitelnost na letounech, u kterých dojde k poškození nebo nutné preventivní výměně. Celková série je zadána na maximální počet 1 000 ks za rok (500 levých, 500 pravých).



Obr. 2 Umístění dílce v letounu [9]

- **Vlastnosti materiálu:** Materiál 2024 Al-Clad je typ slitiny hliníku ( $90 \div 96 \%$ ), mědi (hlavní přísadový prvek - dural) a hořčíku. Patří do skupiny 2000 – určený pro tváření zastudena a používá se ve vytvrzeném stavu. Plech se skládá z jádra ze slitiny 2024 a plátovací vrstvy ze slitiny 1230 (viz tab. 1). Plátovací vrstva o tloušťce  $1,5 \div 5 \%$  tloušťky jádra poskytuje ochranu jádra proti korozi. Pro tloušťky plechu do 0,8 mm se tato vrstva pohybuje mezi  $4 \div 5 \%$  tloušťky jádra.

Tab. 1 Chemické složení 2024 Al-Clad [4]

Obsah [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Fe [%]	Si [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Plátovací vrstva
Min.	3,8	1,2	0,3	-	-	-	-	-	
Max.	4,9	1,8	0,9	0,5	0,5	0,1	0,25	0,15	Al 99,3 %

Tab. 2 Mechanické vlastnosti [4]

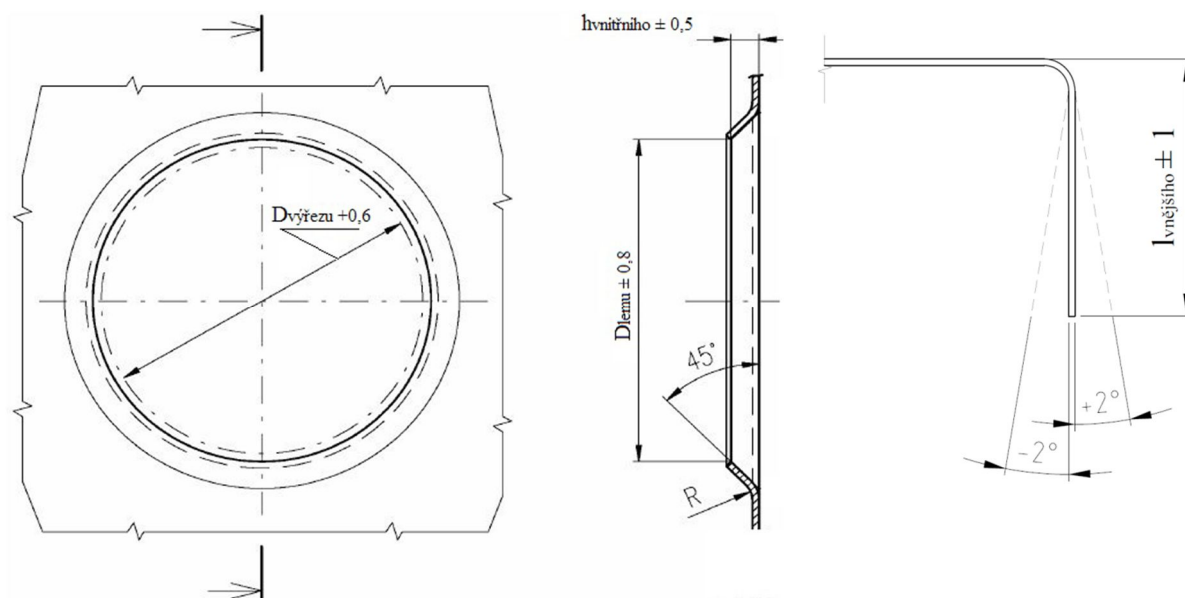
Označení	Tloušťka [mm]	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
Clad 2024 O	0,25-1,57	max. 207	max. 96	12
Clad 2024 T3	0,5-1,57	407	269	15



Obr. 3 Ukázka průběhu náběžné hrany [11]

Přesnost výroby dílce se řídí dle ISO 2768 – cL. Přitom je pro daný typ dílce přípustitelné:

- \* délka vnějších lemů se musí pohybovat v toleranci  $\pm 1,0$  mm,
- \* délka lemů vnitřních je v toleranci  $\pm 0,5$  mm,
- \* úhlové odchylky lemů pro zadanou tloušťku plechu jsou  $\pm 2^\circ$ ,
- \* hodnoty úchylek průměrů lemovaných otvorů pro zadaný dílec  $\pm 0,8$  mm (obr. 4),
- \* u rozvinu žebra je tolerance výchozího průměru lemovaného otvoru  $+0,6$  mm (obr. 4),
- \* celková přípustná odchylka vnějšího obvodu rozvinutého tvaru dosahuje  $\pm 0,5$  mm,
- \* technologické otvory  $\phi 4,1$  mm se řídí dle přesnosti ISO 2768 – mK,
- \* nejvyšší dovolená drsnost upravovaných hran plechu je  $R_a 1,6$

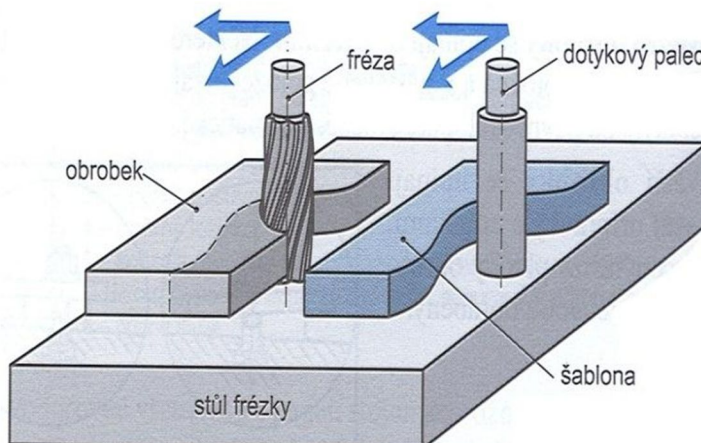


Obr. 4 Schéma tolerancí [5], [6], [7]



V dnešní době spousta leteckých firem vyskytujících se na leteckém trhu často „zaostává“ v použitých technologiích. Díky své specifické výrobě obvykle převažují technologie vzniklé až na počátku 60. let. I přesto však firmy zvládají vyrábět vysoce kvalitní letouny. Starší metodiky lze prezentovat na dosavadní technologii výroby hlavně rozvinutého tvaru dílce. Stávající použité technologie výroby zadané dílu:

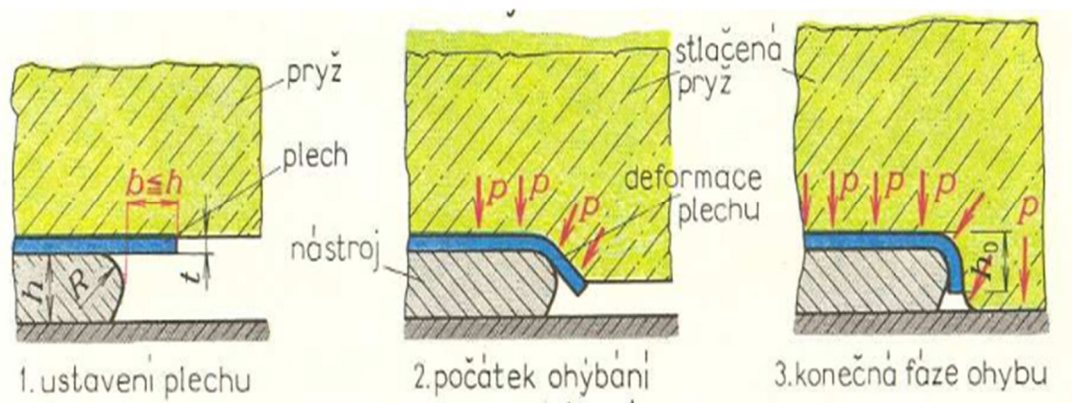
- *Výroba rozvinutého tvaru* je doposud realizována pomocí frézování na běžné konvenční frézce objížděním šablony (obr. 5) vyřezané v kooperaci pomocí laseru. Při frézování je použito mechanického kopírovacího zařízení. Aby bylo sníženo množství upínacích úkonů při frézování dílů, bývá obvykle opracováváno několik plechů na sobě. Obvykle však nelze frézovat všechny zároveň (jedním projetím nástroje). Nevýhodou této technologie výroby je velká pracnost a především časová náročnost v řádu desítek až stovek minut na několik kusů, které však při následném lisování mohou dopadnout jako zmetky.



Obr. 5 Frézování kopírováním šablony [8]

Dalšími nevýhodami je rovněž nízká přesnost a nutnost dokončovacích, zámečnických, začišťovacích operací po frézování.

- *Lisování lemu* je provedeno pomocí metody Guerin (obr. 6). Metoda je založena na principu vnoření lisovníku do polyuretanového nástroje o určité tuhosti. Při lisování dochází k nerovnoměrnému přeskupování materiálu v oblých částech lemu a tudíž vzniku zvlnění, které je pak třeba pracně překlepávat pomocí ručních klempířských prací, čímž je rovněž zasahováno do geometrie výlisku. V oblasti lisování lemu proto bude nutno rovněž zvolit novou technologii, poskytující například vyšší lisovací tlaky a navrhnout jinou geometrii lisovacího/lemovacího nářadí.



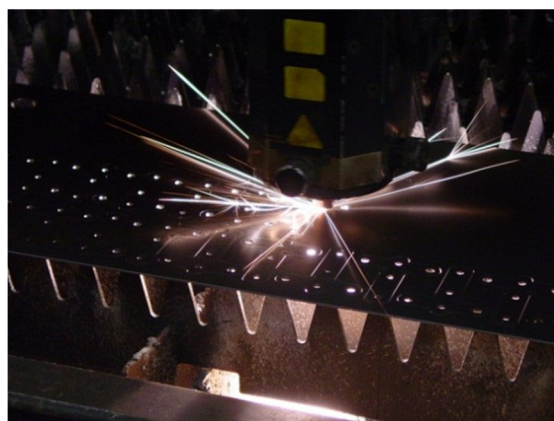
Obr. 6 Princip lisování pomocí polyuretanu [12]

## 1.1 Možné varianty výroby rozvinutého tvaru a lemů [13], [14], [15], [16]

Pro dělení plechů existuje velká řada metod. Metody jsou postaveny na principech od tavných pochodů, přes abrazivní až po třískové. Rozvinutý tvar zadaného dílce proto může být zhotoven technologiemi, jako jsou:

- **Řezání laserem** – technologie (obr. 7) založená na tavném dělení materiálu za pomoci laserového paprsku. Paprsek je přiveden z místa zdroje do místa řezu pomocí systému zrcadel či optických kabelů a je fokusován do vhodně stanovené ohniskové vzdálenosti. Vlivem přivedeného svazku částic je materiál ovlivňován následujícím způsobem:

- materiál se taví, přičemž řezná spára je profukována inertním plynem (často dusíkem), který vyfukuje natavený kov tj. tavné řezání,
- materiál se taví a zároveň spaluje vlivem přidaného kyslíku – oxidační řezání,
- materiál je taven a zároveň odpařován tj. sublimační řezání

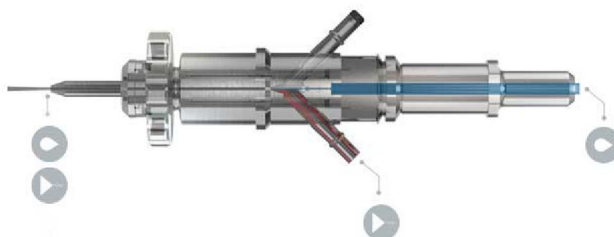


Obr. 7 Řezání laserem [13]

Výkon řezacích jednotek se dnes pohybuje v rozmezí  $1\,200 \div 6\,000$  W při rozmezí řezaných tloušťek do 30 mm. Řezné hrany bývají se stoupající řezanou tloušťkou značně ovlivněny vizuálním natavením a možným vznikem návarů.

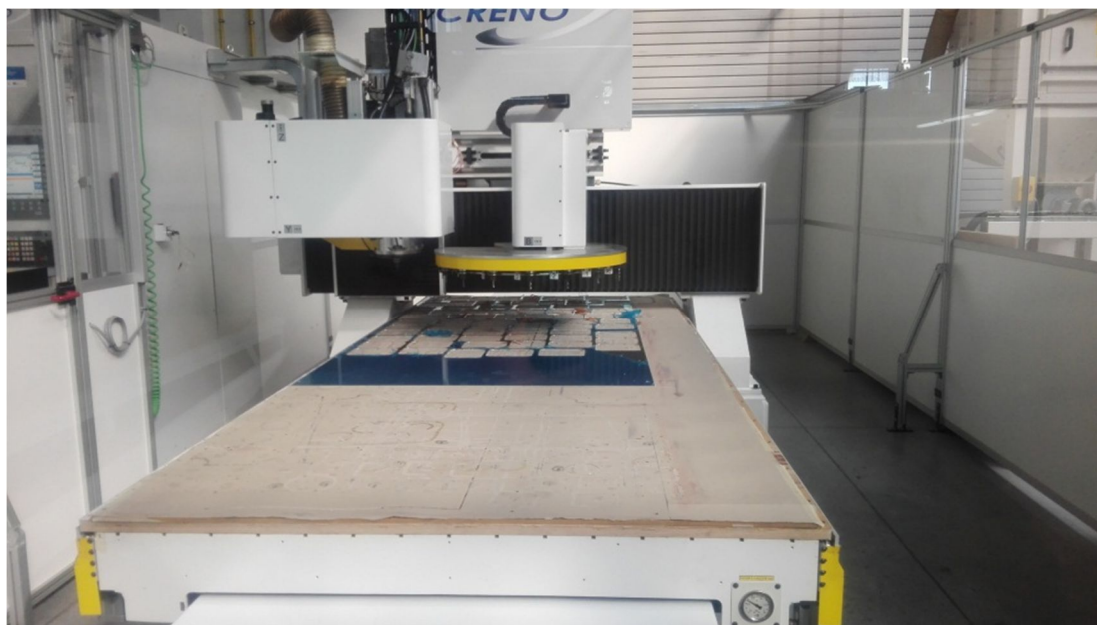
Stroj pracuje s CNC řízením. Nevýhodou technologie jsou vysoké pořizovací náklady a náklady spojené se spotřebou procesních plynů.

- **Řezání vodním paprskem** - spočívá v netavném řezání pomocí kapaliny s abrazivními částicemi řeziva. Vysokotlaké čerpadlo vytvoří proud vody o tlaku až 6 500 MPa, který se prostřednictvím trysky transformuje do proudu o vysoké výstupní rychlosti – řádově až čtyřnásobek rychlosti zvuku. Vysoká rychlost tlakového média s abrazivem pak dostává schopnost řezat měkké materiály o tloušťce přesahující 300 mm. Tato metoda má tedy v porovnání s laserem vyšší schopnost řezat velké tloušťky bez natavení řezných ploch. Stroj pracuje s CNC řízením. Při řezání vodním paprskem stroj používá speciálně navrženou trysku (obr. 8), která má dva základní vstupy. Tyto vstupy představují přísun tlakové vody a vstup abraziva. Pořizovací náklady zařízení jsou však vysoké. Nutností rovněž bývá pořízení nakládacího jeřábu.



Obr. 8 Řezací hlava pro řezání vodním paprskem [14]

- **Frézování CNC frézku** (obr. 9) - Jedná se o 2D frézku s číslicovým řízením podobající se svou konstrukcí stroje metodě řezání laserem nebo vodou. Spočívá ve vyřezávání rozvinutého tvaru pomocí frézy, která se pohybuje po 2D křivce. Výhodou je možnost řezání několika vrstev plechů najednou a dobrá kvalita řezné plochy bez tepelného či abrazivního ovlivnění. Nevýhodou však jsou vysoké strojní časy, vysoké pořizovací náklady a nutná kvalifikovaná obsluha.



Obr. 9 CNC frézka

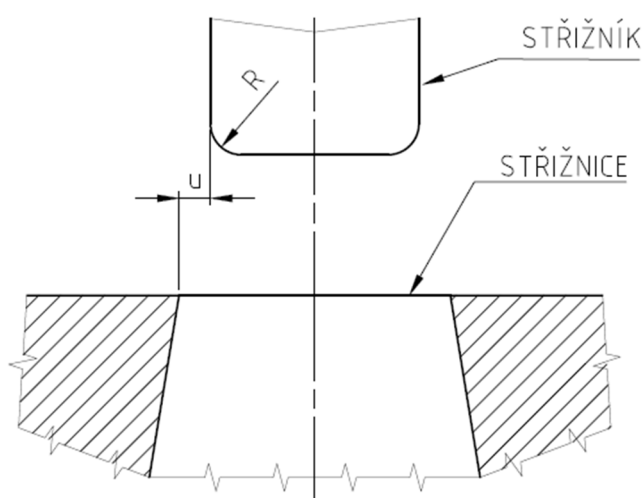
- **Vysekávání** – technologie vysekávání je založena na principu děrování. Nástroj (střížník) je upnut ve vysekávací hlavě. Střížnice je upnuta ve spodní části vysekávacího stroje a společně se střížníkem mají stálou polohu. Polotovar (plech) je posouván po stole pomocí CNC manipulátorů (nebo pohybem celého stolu – obr. 10), přičemž po požadovaném nastavení plechu dojde k proseknutí otvoru pomocí střížníku a střížnice. Postupným obsekáváním naprogramované křivky je pak docíleno požadovaného výstřížku nebo otvoru. Mezi vysekávací nástroje se řadí nejen nástroje střížné, ale rovněž lze razit, vyrábět prolisy či řezat závity. Metoda je hospodárná z hlediska využití materiálu, avšak podobně jako u použití frézky, laseru a vodního paprsku je třeba vyšší pořizovací investice do strojního zařízení a nástrojů.



Obr. 10 CNC vysekávání [15]



- **Metoda přesného stříhání** - technologie přesného stříhání je souhrn variant stříhání v nástroji, kterým lze dosáhnout vysoké přesnosti a jakosti střížné plochy. Součást vyrobená technologií přesného stříhání obvykle již nemusí na konečné úpravy, ale lze ji použít jako hotový díl do sestavy. Střížná mezera se oproti běžnému stříhání ve stříhadlech výrazně snižuje, čímž se tato metoda dostává do oblasti blížící se čistému smyku. Přesné stříhání lze rozdělit na několik základních variant:
  - stříhání s tlačnou hranou,
  - stříhání se zaoblenou hranou (obr. 11),
  - stříhání se zkoseným přidržovačem,
  - přistřižování – nejedná se přímo o stříhání, ale o finální zkvalitňování předstříženého dílce



Obr. 11 Schéma přesného stříhání se zaoblenou hranou [16]

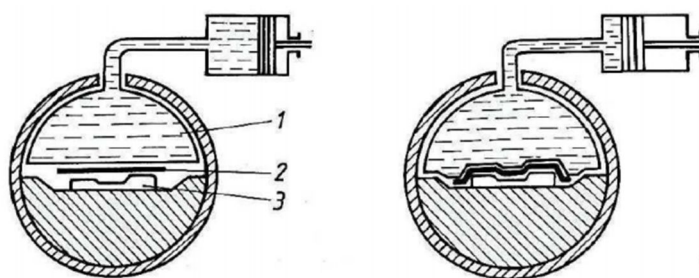
Při lisování leteckých dílů je nutno zamezit jakéhokoliv vzniku defektů. Pro olemování dílce lze využít technologie:

- **Olemování v lisovacím nástroji** - metoda spočívá v založení rozvinutého tvaru na technologické otvory do nástroje s tvarovou dutinou (v horní části) dle výsledného dílce a ohybníku (ve spodní části) téhož tvaru pouze pozitivního. Podobná koncepce nástroje viz obr. 12. Sestava nástroje pro zadaný dílec by vypadala podobně. Pro daný typ nástroje by bylo využito hydraulického lisu, který díky svým možnostem pomalého chodu umožňuje plynulé ohnutí lemů a možnost vizuální kontroly celého procesu. Nástroj vyžaduje poměrně vysoké pořizovací náklady s nároky na přesné obrábění a začištění funkčních ploch.



Obr. 12 Ukázka lisovacího nástroje [17]

- **Ohnutí nepevným nástrojem** - metoda často používaná v leteckém a automobilovém průmyslu. Jako nástroj je zde zhotoven lisovník/ohybník s pozitivním nebo negativním tvarem dílce. Druhá část nástroje je tvořena nepevným nástrojem např. polyuretanovými deskami nalepenými v masivním „kontejneru“ (nebo vakem s kapalinou). Při lisování je nástroj vtlačován do polyuretanu, který vytváří tvářecí tlak. Lisovací tlak je dán tuhostí média (v případě polyuretanu). Metodu lze využít pro velké množství tvářecích operací, jako jsou ohýbání, tažení, stříhání apod. Pro dosažení vyšších tlaků lze využít lisů s kapalinovým vakem (obr. 13).



*1 – kapalina, 2 – polotovár, 3 – lisovací forma*

Obr. 13 Příklad využití kapaliny při lisování [18]

Kvůli snížení pracnosti a zvýšení efektivity výroby firma požaduje prověření možnosti výroby rozvinutého tvaru stříháním. Požadovaný přesun výroby by tedy byl z frézky na méně využívané strojové vybavení. Součástí požadavku je konečné zvážení použité technologie z hlediska nákladů. Společnost se rovněž rozhoduje, zda provést investici do specializovaného pracoviště pro výrobu rozvinutých tvarů. Protože firma vlastní převážně konvenční obráběcí stroje a lisovací techniku, byla na požadavek vedení firmy výroba rozvinutého tvaru omezena. Požadovaný přesun výroby je stanoven na výstředníkový lis LEN 40 C (viz obr. 14).



Obr. 14 Stanovený lis - LEN 40 C



Řezání laserem je efektivní metodou, avšak pro daný typ součásti nevhodný, protože zde dochází k tavení řezných hran, což je pro letecký díl nepřijatelné. Vodní paprsek již tepelné ovlivnění nevykazuje, ale vlivem abrazivního otěru řeziva dochází ke vzniku nekvalitního povrchu řezné plochy a vzniku mikrotrhlin. Efektivnost výroby pomocí laseru a vodního paprsku je srovnatelná. Využití CNC frézky je jeden z vhodných způsobů výroby, avšak firma tuto možnost nemá. U vysekávání je zase dosaženo nekvalitní střížné plochy a nutnosti začišťovacích operací. Pro výrobu rozvinutého tvaru zde bude využito jednoduchého střížného nástroje pro přesné stříhání se zaoblenou hranou. Zmíněná metoda zaručuje vysokou produktivitu výroby a zároveň zaručuje kvalitní střížnou plochu bez tepelného ovlivnění, či vnesení většího množství defektů. Technologie rovněž může odstranit operaci začišťování střížných ploch, což vede ke snížení pracnosti.

Olemování bude provedeno technologií nepevného nástroje – kapalinového vaku. Metoda lisování v nástroji není natolik efektivní kvůli možnému vzniku škrábanců na povrchu dílu a nerovnoměrnému rozložení tlaku potřebného pro ohnutí lemu. Metodou nepevného nástroje rovněž lze lisovat několik dílů najednou dle velikosti lisovacího stolu či vany. Na lisovacím nástroji bude rovněž zapracována korekce odpružení lemů a především návrh řešení problematiky přeskupování materiálu při lemování vypuklých lemů. Vyřešením zmíněného faktu by rovněž mělo přispět ke snížení počtu výrobních operací, jelikož by nemělo docházet ke vzniku zvlnění. Zamezením vzniku zvlnění rovněž povede ke snížení pracnosti.

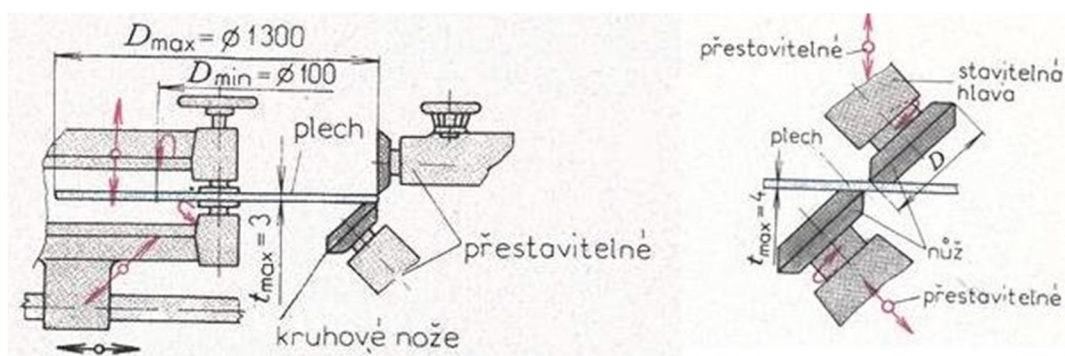
## 2 STŘÍHÁNÍ, OHÝBÁNÍ A LISOVÁNÍ

### 2.1 Stříhání [19], [20]

Stříhání je jedním ze základních způsobů tváření materiálů, který je zakončen porušením materiálu – vznik lomu v místě působení největších smykových napětí. K vzniku plastického lomu dochází podél křivky stříhu. Křivka stříhu je vytvořena pomocí dvou protiběžných střížných hran, které vytváří smykové napětí. Materiál v oblasti stříhu se postupně odděluje.

Stříhání lze rozdělit:

- a) dle tvaru střížné křivky:
  - materiál se oddělí kolem uzavřené křivky stříhu – děrování, vystřihování apod.,
  - materiál se oddělí kolem neuzavřené křivky stříhu – odstříhování, nastříhování apod.
- b) dle metody stříhání:
  - pomocí rovnoběžných nožů,
  - pomocí nožů skloněných pod úhlem čela (menší střížná síla),
  - stříhání kruhovými/kotoučovými noži (obr. 15),
  - dělení materiálu noži na profily



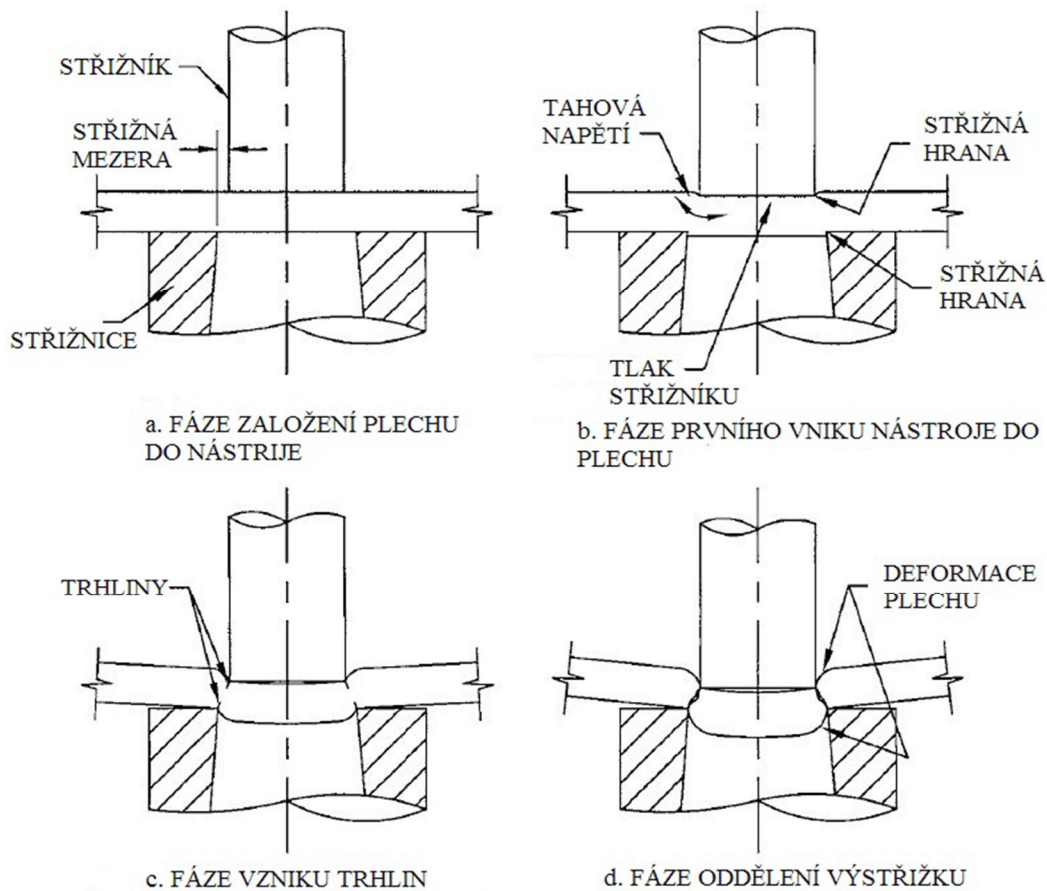
Obr. 15 Ukázka stříhání kotoučovými noži [ ]

#### 2.1.1 Popis operace stříhání ve stříhadlech [19], [20], [21]

Proces stříhání (obr. 16) vzniká od prvního kontaktu střížníku se stříhaným materiálem, který je položen na střížnici. V počáteční fázi vniknutí střížníku do materiálu dochází k elastické deformaci. Vlivem působení střížných hran střížníku a střížnice, dochází ke vzniku střížných oblastí. Tvar střížníku a střížnice zde určuje střížnou křivku. Oblast elastické deformace se vyskytuje v rozmezí 5 ÷ 8 % celkové tloušťky polotovaru (plechu). Se zvětšující se hloubkou vniku střížníku do plechu se materiál začne plasticky deformovat a zpevňovat až do překročení meze pevnosti a vzniku trhliny.

K přenosu střížné síly z nástroje na plech dochází plochou mezi střížníkem a střížnicí. Při použití běžných střížných vůlí se materiál v oblasti stříhu ohýbá. V místech stříhu dochází ke vzniku zaoblení, což je příčinou vytvoření toku materiálu v radiálním směru a vzniku plastické deformace. Vtahování materiálu je ukončeno, pokud střížník vnikne do 10 ÷ 25 % tloušťky polotovaru.

Při vniku střížníku do hloubky větší než je 10 ÷ 25 % tloušťky plechu dochází ke vzniku trhliny vzniklé překročením meze pevnosti a působením střížných hran nástroje. Tahová napětí vyvolaná ve vláknech prvním vniknutím střížníku do materiálu přispívají k šíření této trhliny. V konečné fázi procesu již trhliny začínají vznikat i ze strany střížníku. Na tvorbu trhlín a jejich průběh má velký podíl velikost střížné mezery. Dalším vnikáním nástroje do materiálu dojde k oddělení výstřížku, který propadne střížnicí.



Obr. 16 Schéma střížného procesu [21]

Střížná síla je během stříhání vyvolána dvěma protiběžnými břity. U otevřeného stříhu bez přidržovacího prvku hrozí (vlivem klopného momentu) vtažení plechu mezi nože. Uzavřené stříhání má díky uzavřené křivce stříhu do určité míry potlačit resp. vyvážit ohybové momenty. Může zde však docházet k zdeformování malých výstřížků s vyšší tloušťkou. Rozbor napjatosti v oblasti stříhu znázorňuje obr. 17.

Tahová napjatost v místě A (styk střížníku s plechem) dosahuje maxima ve směru  $\sigma_1$  a lze je stanovit ze vztahu 2.1. Napětí  $\sigma_3$  se dle experimentálních zjištění stanovilo na poloviční hodnotu  $\sigma_1$  (vztah 2.2), je však tlakové. Maximální smykové napětí  $\tau_{\max}$  pak lze stanovit ze vztahu 2.3.

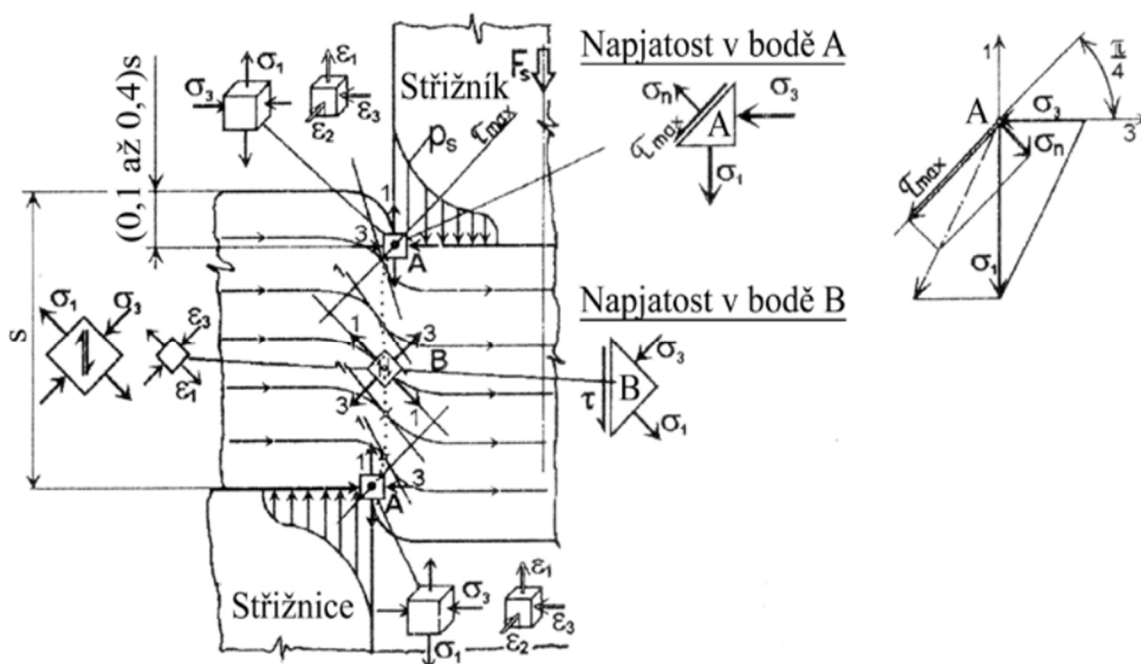
$$\sigma_1 \approx 0,77 \cdot \sigma_p [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

kde:  $\sigma_p = R_m$  – mez pevnosti materiálu [MPa]  
 $\sigma_1$  ... tahová složka napětí [MPa]

$$\sigma_3 = -\frac{\sigma_1}{2} [\text{MPa}] \quad (2.2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{3}{2} \sigma_3 [\text{MPa}] \quad (2.3)$$

kde:  $\sigma_3$  ... tlaková složka napětí [MPa]  
 $\tau_{\max}$  ... maximální smykové napětí [MPa]



Obr. 17 Schéma napjatosti v oblasti stříhu [20]

Z obrázku 17 lze vidět, že normálová složka napětí  $\sigma_n$  (2.4) působí kolmo ke střížné ploše a má tak vliv na otevírání trhliny. Poměr složek napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  se směrem k místu B mění. V místě B pak tyto složky dosahují stejné velikosti, tudíž dochází ke splnění podmínky prostého smyku.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} [\text{MPa}] \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Výpočet střížné síly, práce a vŕle [16], [19], [20], [22]

Na obrázku 18 lze vidět závislost střížné síly na hloubce vniku střížníku do stříhaného materiálu. Při prvním vniku střížníku do oblasti plastické deformace střížná síla prudce narůstá. Do hloubky 5 ÷ 8 % tloušťky plechu se materiál elasticky deformuje. Vlivem narůstající deformace vzniká s rostoucí hloubkou vniku oblast zpevnění materiálu – střížná síla neustále narůstá až do maxima. Po překročení pásma zpevnění dochází (při dalším vniku nástroje) k samovolnému utržení materiálu. Průběh střížné síly dle obrázku 18 platí pro stříhání s rovnoběžnými noži. Použitím např. zkosených nožů lze střížnou sílu značně snížit. Plocha pod křivkou střížné síly pak znázorňuje střížnou práci, kterou lze stanovit ze vztahu 2.6, velikost síly pak ze vztahu:

$$F_{stř} = n \cdot L \cdot (s - h_s) \cdot \tau_s = (1,0 \div 1,3) \cdot (s - h_s) \cdot L \cdot 0,77 \cdot R_m [\text{N}] \quad (2.5)$$

kde:  $n$  – 1,0 až 1,3 [-] koeficient, který zohledňuje okolní podmínky – nerovnosti, otupení břitů apod.

$L$  – délka střížné hrany [mm]

$h_s$  – hloubka vniku střížníku při ustřížení – měkké materiály  $h_s = 0,6s$  [mm]

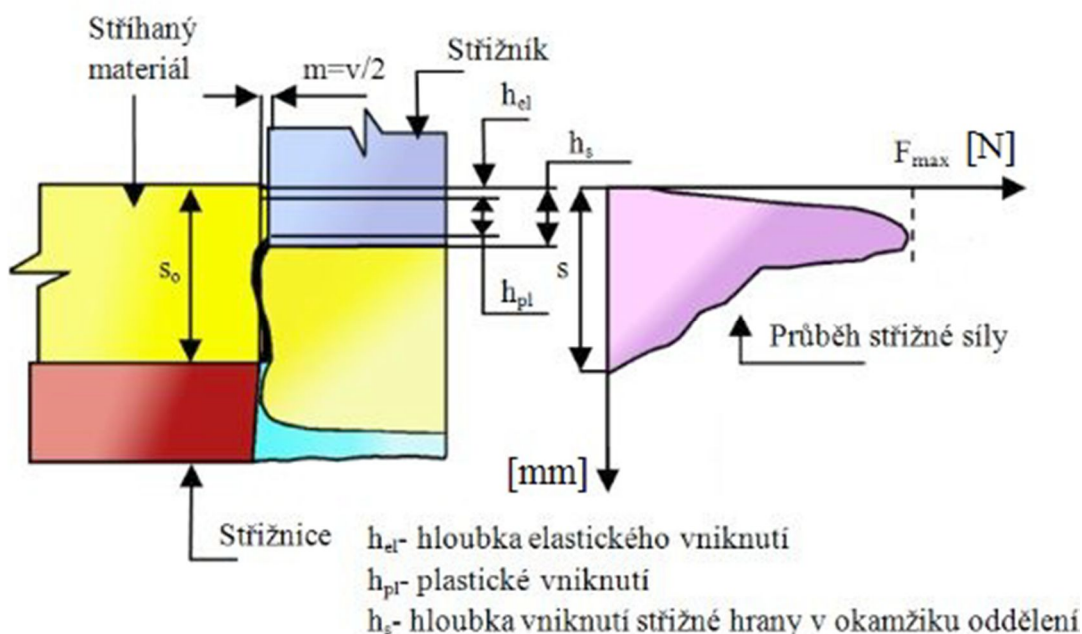
$s$  – tloušťka plechu [mm]

$\tau_s$  – mez pevnosti ve smyku [MPa]

$$A = \lambda \cdot F_{stř,max} \cdot s \text{ [J]} \quad (2.6)$$

kde:  $\lambda$  – součinitel plnosti grafu, pro hliník  $\lambda = (0,5 \div 0,75)$  [-]

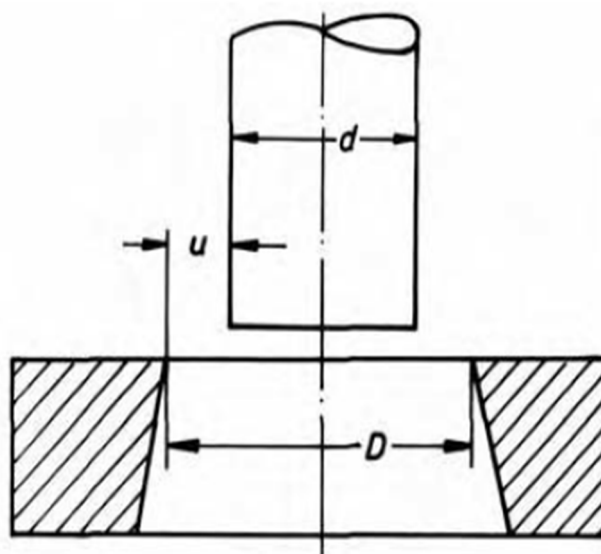
$F_{stř,max}$  – maximální dosažená střížná síla [N]



Obr 18 Střížná síla a práce [23], [24]

Střížnou vůli je myšlena celková velikost mezery mezi střížníkem a střížnicí. Je třeba rozlišovat střížnou vůli („v“) a velikost střížné mezery („u“), která je rovna poloviční hodnotě střížné vůle (obr. 19). Velikost střížné vůle značně ovlivňuje kvalitu střížné plochy, životnost nástrojů, množství spotřebované energie pro stříh apod. Proto je nutné, aby rozložení střížné mezery bylo po celé křivce stříhu rovnoměrné. V případě nerovnoměrného rozložení dochází ke vzniku ostřin, nekvalitní střížné plochy, nadměrnému opotřebení nástroje apod...

Stanovení střížné vůle se provádí na základě požadované geometrie dílce - zda jde o operaci vystříhování (vzniká „přesný“ výstřížek – pás s otvorem je odpad) nebo děrování (vzniká přesný otvor – vystřížený tvar procházející střížnicí je odpad). Velikost střížné vůle je závislá rovněž na tloušťce stříhaného materiálu a jeho jakosti. Hodnoty vůle se pohybují v rozmezí 3 ÷ 20 % tloušťky stříhaného materiálu.



Obr. 19 Schéma střížné vůle [25]

Stanovení střížné vůle „ $v$ “ lze provést třemi základními metodami:

a) Výpočtem ze vztahů:

$$v = 2 \cdot u \text{ [mm]} \quad (2.7)$$

kde:  $u$  ... střížná mezera [mm]

Pro plechy kde  $s \leq 3$  mm:

$$v = c \cdot s \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]} \quad (2.8)$$

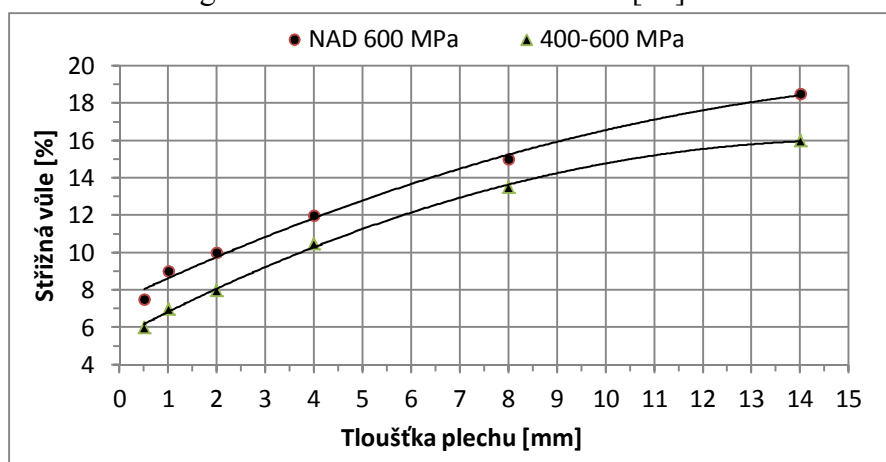
Pro plechy kde  $s \geq 3$  mm:

$$v = (1,5 \cdot c \cdot s - 0,0015) \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_s} \quad (2.9)$$

kde:  $c$  ... součinitel volený dle metody stříhání (přesné stříhání  $c = 7 \cdot 10^{-4}$ )

b) Grafickou metodou:

Graf 1 Příklad grafického stanovení střížné vůle [22]



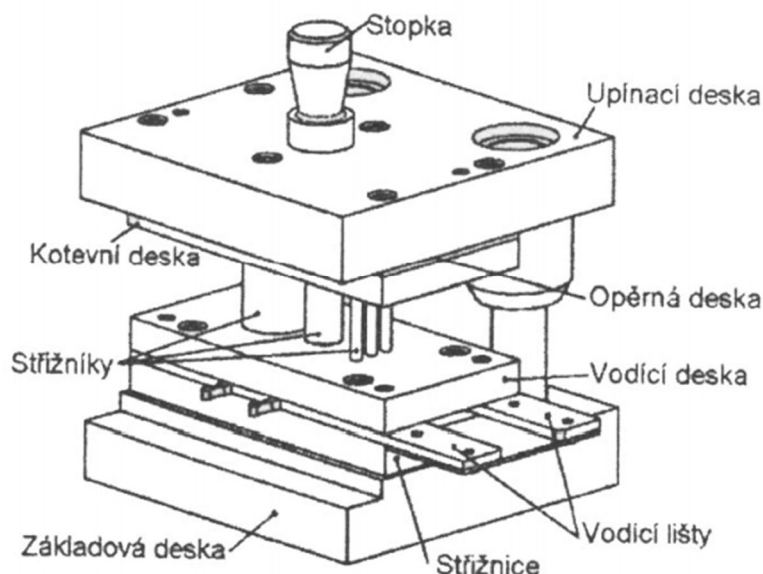
c) Určení z tabulek:

Tab. 3 Hodnoty střížné vůle [22]

Materiál	Střížná vůle [%]	
	tl. do 2,5 [mm]	tl. nad 2,5 [mm]
Ocel měkká	5	7 ÷ 1
Ocel středně tvrdá	6	6 ÷ 1
Ocel tvrdá	7 ÷ 9	7 ÷ 1
Hliník	4 ÷ 7	5 ÷ 9
Dural	7 ÷ 8	7 ÷ 1
Měď měkká	4 ÷ 5	5 ÷ 6
Měď polotvrdá a tvrdá	6 ÷ 7	6 ÷ 7
Mosaz měkká	4 ÷ 5	4 ÷ 6
Mosaz polotvrdá a tvrdá	5 ÷ 6	5 ÷ 7

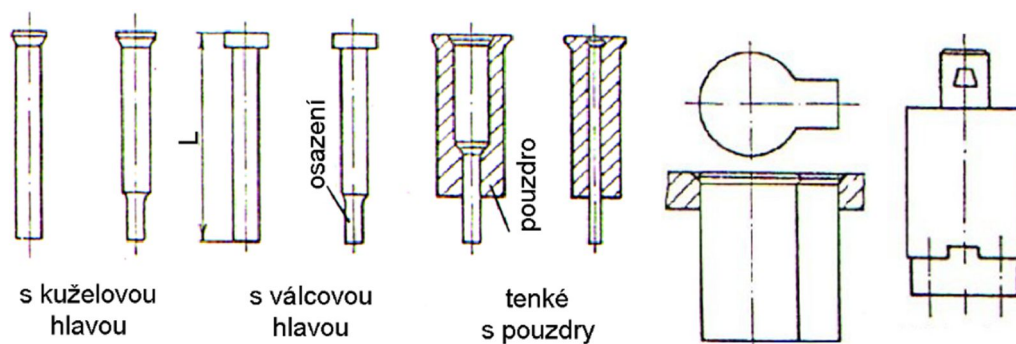
### 2.1.3 Základní sestava střížného nástroje [19], [20], [26]

Základní sestavení střížného nástroje s vedením viz obr. 20. V dnešní době existuje na trhu velké množství dodavatelů většiny částí stříhadel, což značně zlevňuje jejich pořizovací náklady a usnadňuje výrobu. Nástroj může být rovněž zhotoven v provedení bez vodících sloupků, kde je vzájemná poloha horní a dolní části nástroje dána pouze nastavením beranu lisu a vodící deskou.



Obr. 20 Základní sestava střížného nástroje s vedením [20]

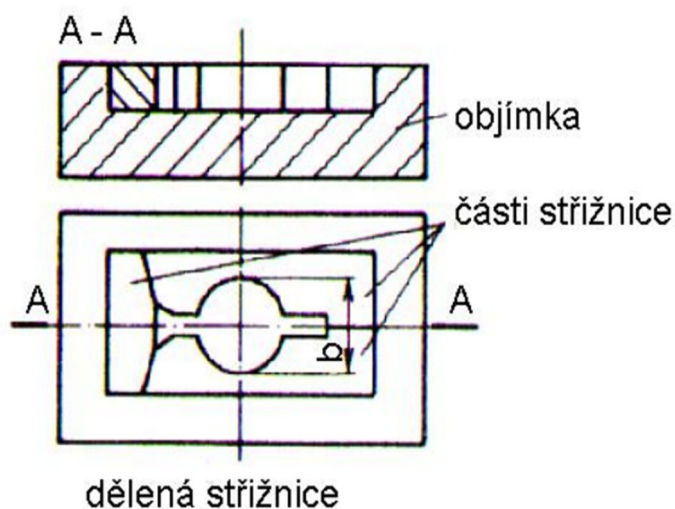
- **Střížník** - je jedním ze základních konstrukčních prvků všech střížných nástrojů. Obvyklá geometrie střížníků je složena z části upínací (hlavy) a části dříku, ve které pak mohou být tvory pro vyhazovací prvky odpadu nebo prvky pomocné. Vnější tvar střížníku je shodný se stříhaným tvarem. V případě střížníků s vyhazovači bývají obvykle použity vyhazovače kruhového tvaru. U složitých tvarů kde se lze obávat vyštipování či ulomení nástroje je výhodné tyto prvky navrhovat vložkované (obr. 21). Střížníky lze rovněž navrhovat jako skládané s tím, že jednu část tvoří tvarová část nástroje a druhou část zbytek těla střížníku z levnějšího materiálu. Tyto prvky jsou pak vzájemně prokolíkovány a sešroubovány.



Obr. 21 Schéma provedení štíhlých střížníků a skládaných vložkováných střížníků pro větší výstřižky [26]



- **Střížnice** - kromě střížníku je dalším důležitým prvkem vhodně navržená střížnice. Z hlediska její vnější geometrie je obvyklé uspořádání kruhové nebo obdélníkové. Pro tyto prvky rovněž platí, že u tvarů které jsou náchylné na ulomení, je vhodné vložkovat a složité tvary špatně zhotovitelné dnes běžně přístupnou NC technikou navrhovat jako skládané (obr. 22) spojené v jeden celek objímkou. Jednotlivé segmenty lze spojit rozebíratelně nebo nerozebíratelně. U rozebíratelných střížnic a přidržovačů je však důležité, aby byla zajištěna stejná poloha segmentů jako před rozebráním.



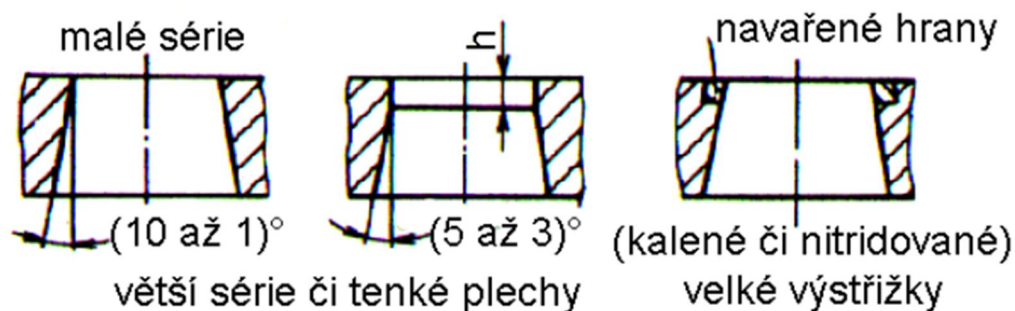
Obr. 22 Schéma uspořádání skládané/dělené střížnice [26]

Spolehlivým typem upnutí střížnic v případě přesného stříhání je:

**Kruhové střížnice** – upínání pomocí kuželového vybrání vytvořeného v jedné ze základen stojánku. Střížnice je zalisována s přesahem  $0,2 \div 0,3$  mm do kuželového vybrání s obvyklým úkosem  $3^\circ$ . Vzájemné pootočení prvku je zajištěno pomocí kolíku. Oba prvky jsou rovněž přitaženy šrouby.

**Obdélníkové střížnice** – upínání zmíněných prvků je vhodné řešit podobným způsobem jako střížnice a přidržovače kruhové. U obdélníkových střížnic a přidržovačů se využívá upínání do klínové drážky. Prvky jsou rovněž zalisovány se stejným přesahem. Dotlačení k protilehlému čelu je provedeno pomocí vloženého klínu. Střížnice i přidržovač jsou stejně tak sešroubovány se stojánkem. Další metody upínání mohou být např. pomocí lícovaných kolíků a šroubů, nebo po ustavení obou prvků použít nerozebíratelného spojení vytvořeného pomocí slitiny kovu (zalití).

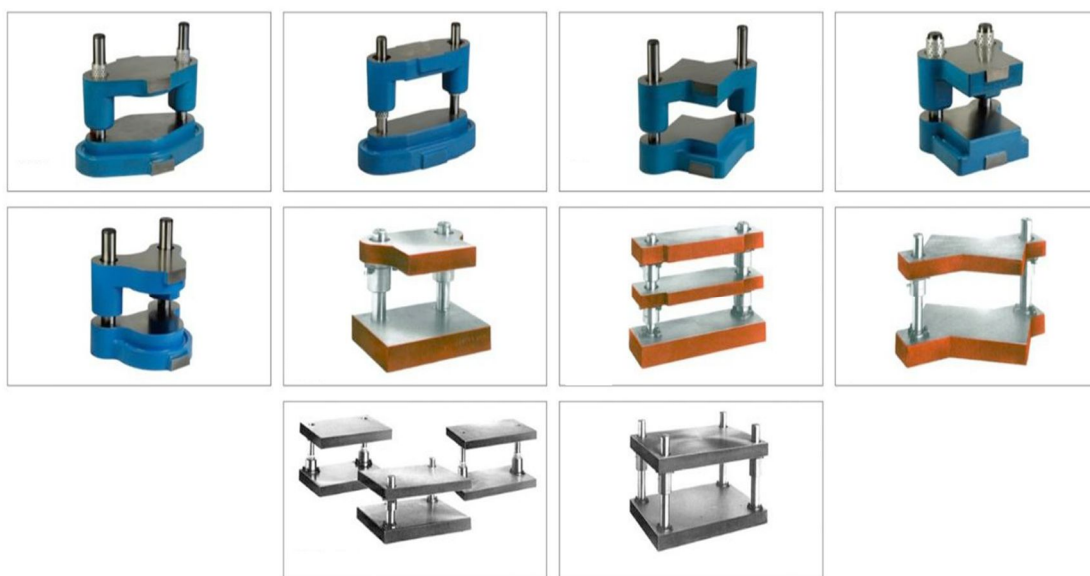
Funkční části střížnic bývají upravovány dle charakteru výstřížku nebo velikosti výrobní dávky (obr. 23).



Obr. 23 Ukázka úpravy střížnic [26]

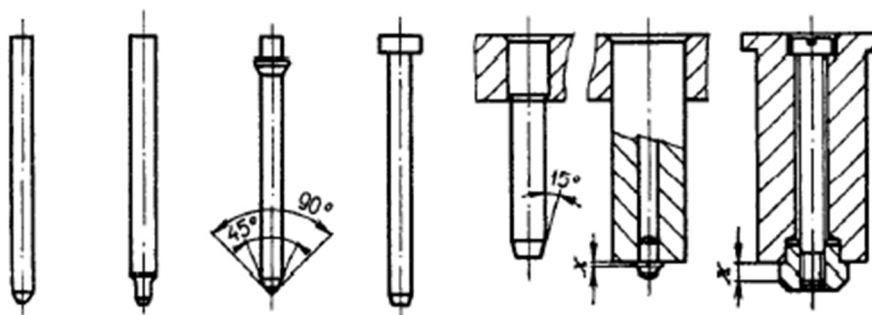


- **Vodící stojánky** - Vodící stojánky se dodávají v několika základních provedení. Na stojáncích lze rozlišit uspořádání dle vodících sloupků a materiálu (ocelové nebo litinové), resp. způsobu výroby stojánku (obr. 24). Pro přesné stříhání je důležitá dostatečná tuhost a kvalitní vedení. Dodavatelé obvykle nabízejí ke každému typu stojánku možnost výběru typu vedení (kluzné, kuličkové apod.). V dnešní době lze většinu komponentů pro lisovací nářadí běžně sehnat od dodavatelů, což značně usnadňuje výrobu a snižuje pořizovací cenu nástrojů. Následně je už na konstruktérovi nástrojů jakým způsobem si normalizované (dodané) díly nástrojů upraví.



Obr. 24 Příklad normalizovaných stojánků [27]

- **Upínací stopka** – Slouží pro upnutí pohyblivé části nástroje do beranu lisu. Existuje rozsáhlé množství tvarů. Volba tvaru se odvíjí od upínacích možností lisu. Stopka bývá přišroubována do upínací desky nástroje.
- **Hledáčky a dorazy** – Použití hledáček (obr. 25) je často nedílnou součástí postupového nástroje, kde je potřeba upravit polohu pásu před stříhem. U výstřižků kde se nelze zahledat na otvor zhotovený v předešlém kroku, lze umístit zahledávací otvor do okrajového odpadu za cenu střížníku navíc. Dorazové prvky slouží pro přesné nastavení velikosti kroku při posunu plechu. Používanými typy jsou dorazy pevné, načínací, zpětné, odpružené, ostřihovací lišty apod...



Obr. 25 Provedení hledáček [26]

Materiály funkčních částí stříhadel se liší podle velikosti nástroje a rovněž dle tloušťky a druhu stříhaného materiálu. Nutno rovněž zohlednit velikost vyráběné série, která má razantní vliv na životnost resp. opotřebení funkčních ploch nástrojů. Příklad používaných materiálů částí stříhadel jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Výběr materiálů částí stříhadel [26]

Prvek nástroje	Materiál ČSN
střížníky	19 191, 19 356, 19 312, 19 436, 19 711
střížnice	
vodící desky	11 500, 11 600, 12 050
pouzdra střížníků	14 160, 19 221
vložky	19 083
upínací/základové desky	11 500, 11 600, 12 050
hledáčky, dorazy	12 061, 14 220
stopky	11 500, 11 600

#### 2.1.4 Určení polohy upínací stopky [1], [21],

Je-li nástroj složen z více střížníků nebo střížníku obecného (nesymetrického) tvaru, je třeba správně určit polohu výslednice střížné síly (polohu těžiště). Při nesprávném stanovení těžiště dochází k působení klopných momentů a k nadměrnému opotřebení střížných hran, což vede ke snížení životnosti nástroje. Existuje zde rovněž nebezpečí nadměrného namáhání beranu lisu, ve kterém je nástroj upnut pomocí stopky.

K určení polohy těžiště střížných sil lze použít několika základních metod:

- určení pomocí 3D modelu a výpočtového programu,
- určení výpočtem,
- určení grafickou metodou

Postup stanovení souřadnic těžiště pomocí výpočtové metody je následovný:

Metoda je založena na rovnováze momentů působících sil. V první fázi je potřeba zavést v soustavě střížníků souřadný systém. Následně se označí elementy střížných křivek ( $l_1, \dots, l_n$ ) u nichž je známá poloha těžiště. Pro výpočet jsou tyto křivky dostačující, protože střížná síla je rozložena rovnoměrně po této křivce. V další fázi se označí souřadnice těžišť jednotlivých elementů, do kterých se umístí střížné síly a stanoví se rovnice rovnováhy dle vztahů 2.10 a 2.11. Obrázek 26 znázorňuje pouze výpočet v ose „x“ protože se jedná o symetrické rozložení tudíž je jedna souřadnice těžiště dána osou symetrie. V opačném případě se výpočet provede i v ose „y“.

Těžiště střížných sil v ose x:

$$x_s = \frac{F_1 \cdot x_1 + \dots + F_n \cdot x_n}{F_c} \quad (2.10)$$

kde:  $x_1 \dots x_n$  ... souřadnice v ose x [mm]

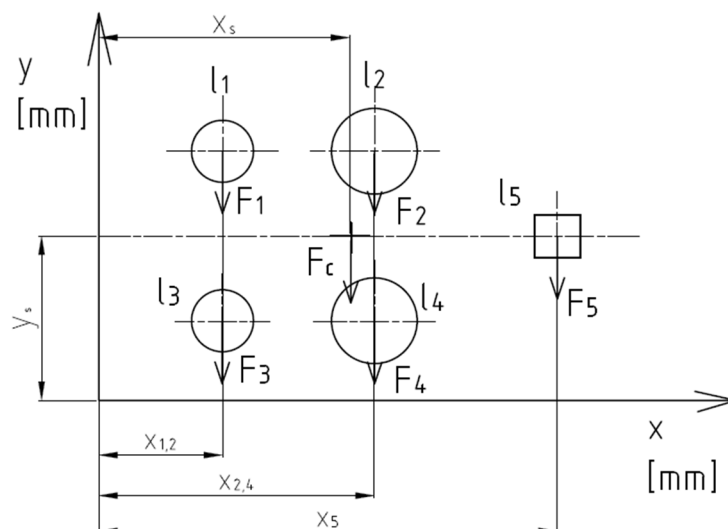
$F_1 \dots F_n$  ... jednotlivé střížné síly [N]

$F_c$  ... výsledná střížná síla [N]

Těžiště střížných sil v ose y:

$$y_s = \frac{F_1 \cdot y_1 + \dots + F_n \cdot y_n}{F_c} \quad (2.11)$$

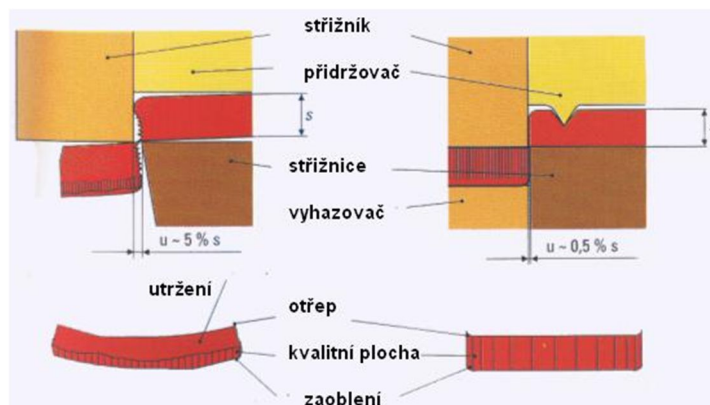
kde:  $y_1 \dots y_n$  ... souřadnice v ose y [mm]



Obr. 26 Schéma stanovení těžiště [1]

## 2.2 Stříhání se zvýšenou přesností [19], [22]

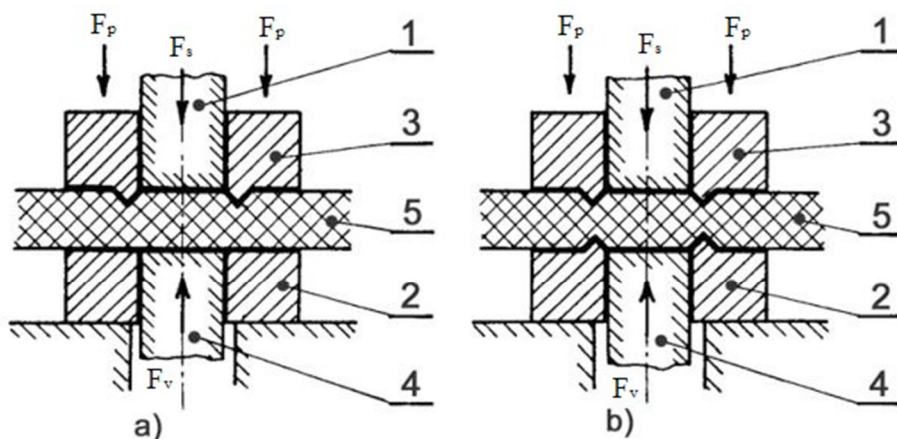
Součásti pro přesné stříhání se obvykle vyznačují uzavřenou křivkou stříhu, což vede k návrhu sloučených stříhadel ve kterých se vystřihuje současně vnější i vnitřní tvary dílce. Vlivem vzájemného působení střížného nástroje a lisu neproběhne tvorba trhlin způsobených plastickou deformací plechu jako je tomu u klasické metody stříhání. Použití přesného stříhání je omezeno tvárností plechu, tzn. že ne každý materiál je vhodný pro přesné stříhání. Pro tuto technologii je volena velmi malá střížné vůle. Jakost střížných ploch a rozměrová přesnost obvykle splňuje požadavky hotového dílu a nevyžaduje tak další opracování – dílec lze rovnou použít do sestavy nebo k dalšímu zpracování (obr. 29).



Obr. 29 Porovnání metody přesného stříhání s tlačnou hranou a běžného stříhání [22]

### 2.2.1 Stříhání s nátláčnou a zaoblenou hranou [16], [19], [20], [30], [31], [32]

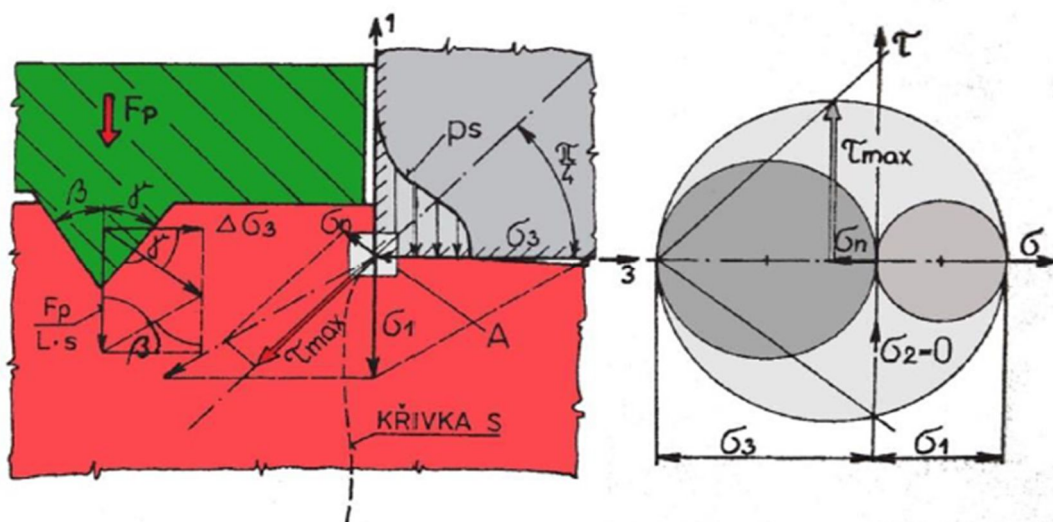
Princip stříhání s nátláčnou hranou je patrný z obr. 30. Před konečným ustřížením dochází k zatlačení nátláčné hrany přidržovače do stříhaného materiálu. Tlačná hrana je umístěna v dostatečné vzdálenosti od vnějšího obvodu stříhaného dílce. Z důvodu sevření materiálu mezi přidržovač a střížnici dochází k zamezení průhybu plechu – tlačná hrana brání radiálnímu pružení. Vnořením tlačné hrany do materiálu dochází ke vzniku prostorového stavu napjatosti, která rozšiřuje pásmo stříhu na celou tloušťku plechu.



Stříhání s nátláčnou hranou (a – nátláčná hrana na přidržovači, b – nátláčná hrana na přidržovači i na střížnici, 1 – střížník, 2 – střížnice, 3 – tlačná deska, tj. přidržovač, 4 – vyhazovač, 5 – stříhaný materiál)

Obr. 30 Stříhání s tlačnou hranou [28]

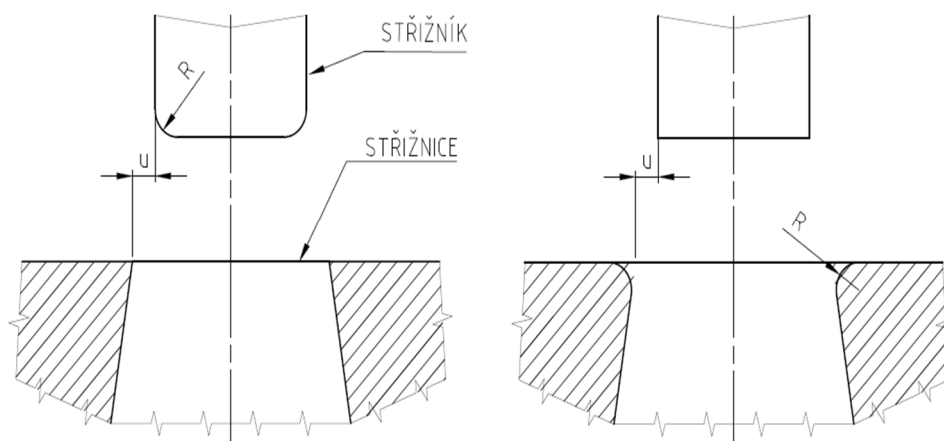
Při přesném stříhání je vlivem vnoření tlačné hrany do materiálu vytvořeno tlakové napětí  $\Delta\sigma_3$  (viz obr. 31), což vede ke změnám podmínek v oblasti stříhu. Hodnota normálního napětí  $\sigma_n$  pak dosahuje záporné hodnoty. Záporné normální napětí se následně snaží uzavírat vznikající trhliny, které se šíří ve směru hlavního smykového napětí  $\tau_{max}$ . Rozklad složek napjatosti a znázornění v Mohrových kružnicích je pak patrný z obr. 31.



Obr. 31 Rozklad složek napjatosti při přesném stříhání [20], [29]

*Metoda stříhání se zaoblenou hranou* je svou konstrukcí nástrojů téměř stejná jako nástroje pro běžné stříhání. Využívá se zaoblení na střížné hraně střížníku nebo střížnice (obr. 32) k zabránění tvorby trhliny v místě stříhu. Zaoblení střížných hran zde vyvolává částečné dopředné protlačování a vznik dvouosé napjatosti. Proto je důležité, aby stříhaný materiál měl dostatečnou tvárnost. Střih zaoblenou hranou na střížnici způsobí zvýšenou kvalitu střížné plochy obrysů, v případě zaoblení střížníků je dosaženo zvýšené kvality u otvorů. Kvalita střížné plochy je ovlivněna velikostí zaoblení a velikostí střížné mezery „u“. Funkční zaoblení střížné hrany dosahuje velikosti  $15 \div 20$  % tloušťky stříhaného materiálu. Pro geometricky složitější výstřižky se zaoblení střížné hrany volí až 25 % tloušťky plechu se střížnou mezerou  $v = 0,01 \div 0,025$  mm (doporučuje se co nejmenší). Stříhání je vhodné pro obrysy, které neobsahují ostré přechody resp. minimální poloměr zaoblení rohu je 25 % tloušťky plechu nebo více. Obvykle je velikost zaoblení volena co nejmenší (dokud je ještě dosaženo požadované jakosti ploch). V případě volby příliš velkého zaoblení střížných nástrojů nedochází ke zvyšování jakosti, ale k nárustu průhybu výstřižku a vzniku větších otřepů. V místě výstřižku kde se nachází různé výřezy, výčnělky a jiné konstrukční prvky, se doporučuje snížit hodnotu zaoblení střížné hrany až o 50 %. V opačném případě může docházet k nadměrnému lokálnímu vytahování materiálu a vzniku ztenčení plechu. Velikost střížné síly bývá o  $10 \div 30$  % vyšší než u běžného stříhání. Výstřižky stříhané zmíněnou technologií nedosahují ideální kolmosti střížných ploch, ale jsou pod nepatrným úkosem. Úkos však není nijak ovlivněn volbou velikosti zaoblení střížných hran.

Metoda se používá pro slitiny s nízkou pevností a dostatečnou tvárností, tj. pro měkkou ocel, hliníkové slitiny, slitiny mědi apod. Konstrukce střížnic je kvůli vysokým zatěžujícím silám dostatečně masivní. Pokud je střížnice dělená pak musí být vhodně bandážovaná, resp. může být částečně zasazena v základní desce, což nahrazuje bandáž. Při nižších zatěžujících silách je možné střížnici konstruovat standardně. Volba mezi zaoblením střížnice nebo střížníku se odvíjí od charakteru operace – děrování (zaoblený střížník), vystřihování (zaoblená střížnice).



Obr. 32 Schéma nástrojů se zaoblenou hranou [16]

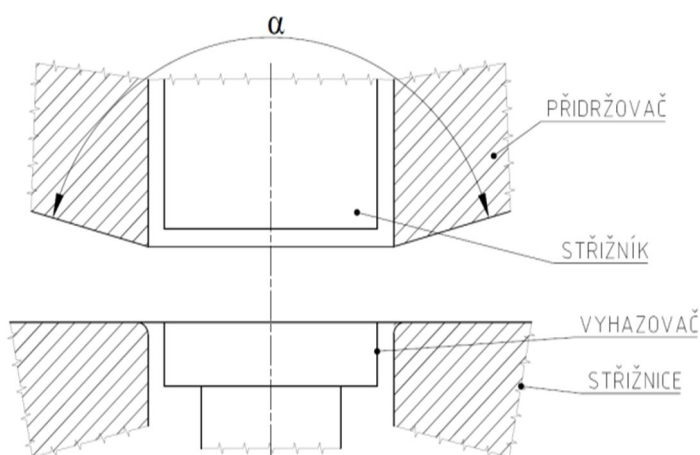
S ohledem na přesnost lze metodou dosahovat stupně přesnosti IT 9  $\div$  IT 11. Dosahovaná jakost povrchu je v rozmezí Ra 0,4  $\div$  Ra 0,8. Lze tedy říci, že metoda je zaměřena spíše ke zkvalitnění střížné plochy než k dosahování vysokých přesností. Vlivem zaoblení a výskytem pružné deformace dochází po vystřižení dílce k částečnému zvětšení dílu. Tuhost nástroje a zaručení vzájemné polohy střížníků a otvorů ve střížnici je důležitým konstrukčním

faktorem pro tenhle typ technologie. Nejčastěji se doporučuje navrhovat nástroje se čtyřsloupkovým uspořádáním nebo dvousloupkovým úhlopříčným uspořádáním, případně použít valivé uložení sloupků. Zaoblení střížných hran musí být pečlivě provedeno s plynulým přechodem na rovinné či tvarové přilehlé plochy. Část otvoru ve střížnici která se vyskytuje pod zaoblením, se navrhuje jako  $1 \div 2$  násobek tloušťky stříhaného plechu. Zbývající část otvoru bývá odlehčena úkosem o velikosti  $1^\circ \div 2^\circ$ . Pro dosažení minimálního otřepu, je nutné, aby střížníky vjížděli do střížnice alespoň do hloubky o velikosti zaoblení. Metoda je stejně jako u běžného stříhání využita pro výstředníkové lisy s vysokou tuhostí a dostatečným vedením beranu lisu.

### 2.2.2 Stříhání se zkoseným přidržovačem, přistříhování a kalibrace otvorů [16], [19]

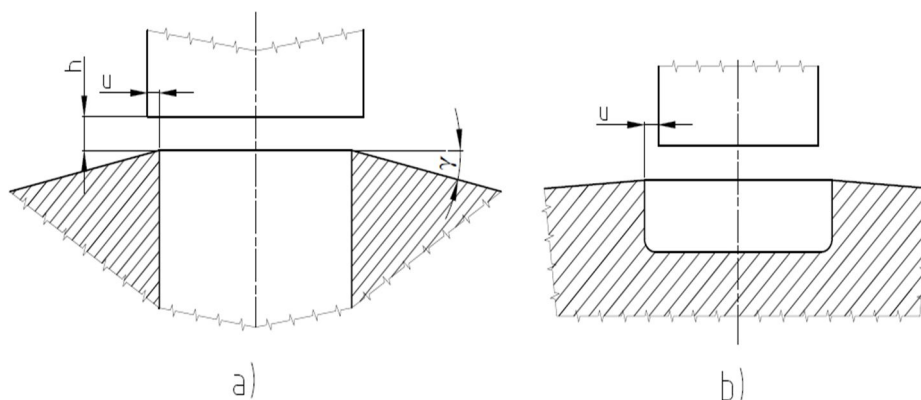
U *stříhání se zkoseným přidržovačem* se využívá přidržovač (obr. 33) s úhlem rozevření „ $\alpha$ “, který zde přispívá ke vzniku dvojosé napjatosti a nedochází k ohýbání okraje výstřížku. Úhel rozevření přidržovače „ $\alpha$ “ je nejčastěji volen  $178^\circ 30'$  a zaoblení střížnice 0,01 mm nebo menší.

Podobně jako u stříhání s využitím nátlčné hrany je zde použito vyhazovače výstřížku, který koná střížný pohyb společně se střížníkem. Metoda se v praxi příliš nevyužívá.



Obr. 33 Schéma nástroje se zkoseným přidržovačem [16]

*Přistříhování* (obr. 34) je jednou z operací dodatečných, při které lze dosáhnout vysoké jakosti střížného povrchu a přesnosti výstřížku. Metoda spočívá v odebrání přídavku z předchozí operace. Střížnice má úhel čela ( $\gamma$ ) v rozmezí  $10^\circ \div 16^\circ$  podle druhu a pevnosti přistříhovaného materiálu. Nástroje mohou být v provedení pro přistříhování jak otvorů, tak i vnějších obrysů. Metoda může být realizována s kladnou (obr. 34b – přistříhování otvorů) i zápornou (obr. 34a – přistříhování obvodu) vůlí.



Obr. 34 Schéma přistříhovacích nástrojů [16]



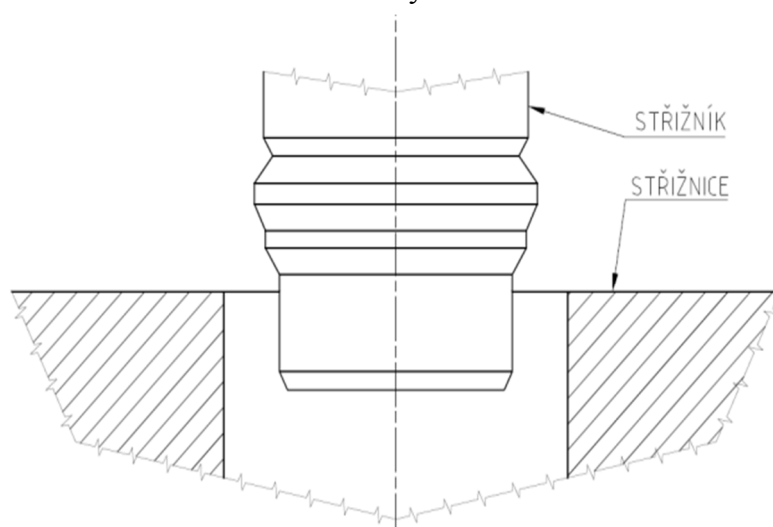
Při přistřihování se zápornou vůlí je důležité správně stanovit minimální vzdálenost, ve které se musí střížník zastavit nad střížnicí, aby nedošlo ke kolizi a následnému zničení nástroje. Přistřihovací nástroj lze sloučit s nástrojem pro běžné stříhání.

Přídavek na přistřihování je závislý na:

- drsnosti ploch po předchozí operaci,
- velikostí odchylek tvaru a polohy polotovaru,
- velikostí odchylky na zastředění polotovaru na střížnici

*Kalibrování otvorů* je znázorněno na obr. 35. Kalibrování je možné aplikovat na obvodových i vnitřních plochách dílu. Na zaváděcí část střížníku bývá navržen náběh s úhlem 5°. Velikost kalibrovacích ploch se pohybuje v rozmezí 1 ÷ 3 mm.

Při kalibrování otvorů má zásadní vliv na kvalitu výsledného otvoru jeho umístění od okraje polotovaru. V porovnání s přistřihováním je kalibrování vlivem vzniklého odpružení méně přesné, dochází však k deformačnímu zpevnění okraje otvoru. Silové zatížení stroje je vyšší než při přistřihování.

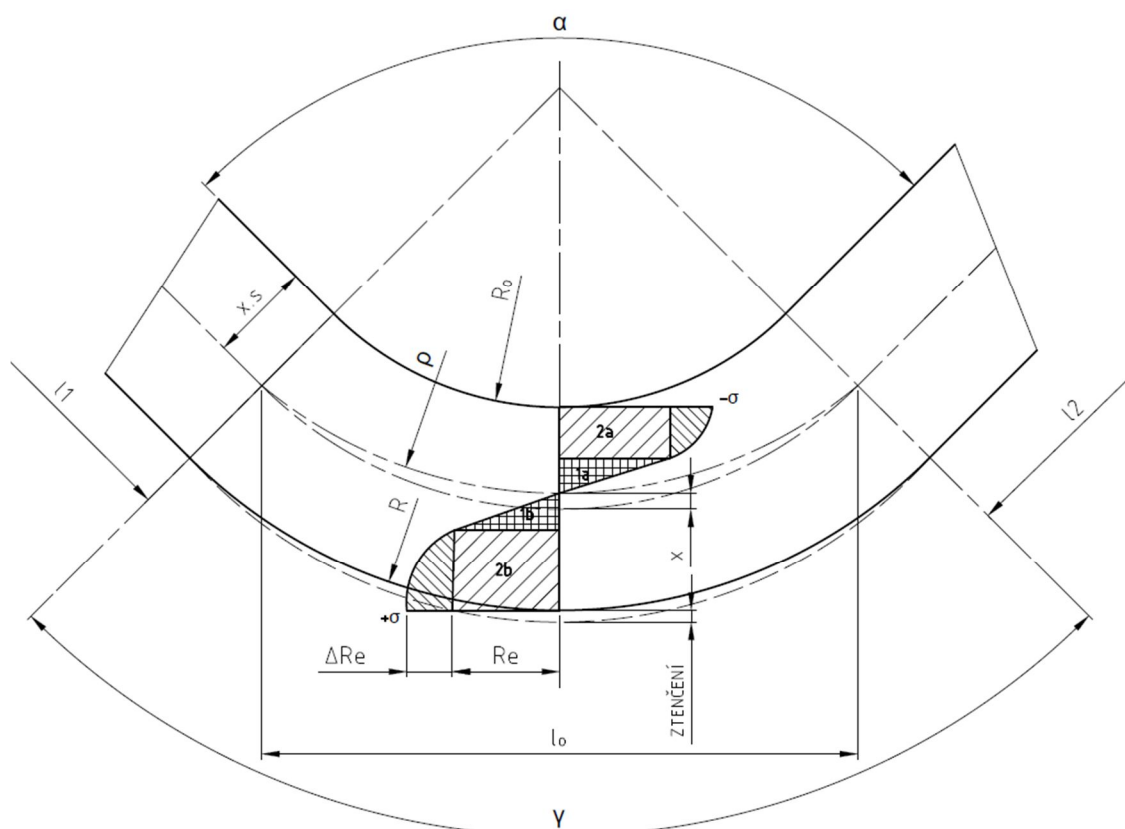


Obr. 35 Kalibrování otvorů [16]

## 2.3 Ohýbání [16], [20]

Ohýbání je druh tvářecí operace, který je v široké míře využíván ve spoustě strojírenských oblastí. Při ohýbání dochází k trvalé deformaci materiálu. Materiál se během operace ohýbá nebo rovná. Ohýbáním lze zpracovávat různé typy polotovarů např. plechy, profily, dráty apod... Součásti vzniklé zmíněnou technologií často obsahují více než jeden ohyb. Stejně jako u stříhání je tento druh tváření prováděn převážně za studena. Existuje velké množství ohýbacích metod od volného po ohýbání ve specializovaných nástrojích. U materiálů kde hrozí nebezpečí praskání, se ohýbá za tepla.

Na geometrickém modelu zmíněné operace (obr. 36) lze vidět princip vzniku ohybu. Materiál se nejprve elasticky deformuje až do překročení meze kluzu. Pro překročení meze kluzu nastává plastická deformace doprovázená vznikem deformačního zpevnění. Následkem deformace je pak vznik požadovaného ohybu s daným úhlem a poloměrem ohybu. Na průběhu napětí lze vyznačit část elastické deformace, která po odlehčení vyvolá určitou míru odpružení materiálu. Velikost odpružení je následně nutné řešit zvětšením úhlu ohybu o hodnotu odpružení.



*1a, 1b – průběh pružné deformace; 2a, 2b – průběh plastické deformace;  $\Delta Re$  – zpevnění materiálu;  $x$  – posunutí neutrální osy [mm];  $R_0$  – poloměr ohybu [mm];  $l_0$  – délka ohybu [mm];  $\rho$  – poloměr neutrální osy/plochy [mm];  $\alpha$  – úhel ohybu [°];  $\gamma$  – úhel ohnutého úseku [°],  $l_{1-2}$  – rovné úseky před ohybem [mm]*

Obr. 36 Geometrický model ohýbání [16]

### 2.3.1 Maximální a minimální poloměr ohybu [16], [26]

Minimálním poloměrem ohybu ( $R_{min}$ ) lze rozumět nejmenší velikost poloměru, kterého lze na daném dílci ohýbáním dosáhnout, aniž by došlo k porušení resp. vzniku trhlin v oblasti ohybu. Jeho velikost se odvíjí od plastičnosti materiálu, tepelném zpracování polotovaru, anizotropii, velikosti ohybového úhlu  $\alpha$ , způsobu ohýbání a tloušťce materiálu. Důležité je provádět ohýbání příčně k vláknům materiálu. Pro vybrané materiály lze minimální hodnoty poloměru ohybu stanovit pomocí normy. Pro orientační určení této hodnoty je možné využít empirických vztahů:

$$R_{min} = 0,25 \cdot s \text{ [mm]} \quad \dots \text{ měď} \quad (2.12)$$

$$R_{min} = (0,4 \div 0,8) \cdot s \text{ [mm]} \quad \dots \text{ měkká ocel} \quad (2.13)$$

$$R_{min} = (1 \div 1,5) \cdot s \text{ [mm]} \quad \dots \text{ hliník} \quad (2.14)$$

Velikost minimálního poloměru lze rovněž stanovit přesnějším výpočtem, ve kterém je zahrnuta nejen tloušťka materiálu, ale taky mezní prodloužení.

$$R_{min} = \frac{s}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \text{ [mm]} \quad (2.15)$$



kde:  $\varepsilon$  ... mezní prodloužení, při jehož překročení dochází ke vzniku trhlin a jiných defektů – z tahové zkoušky [-]

Maximálním poloměrem ohybu ( $R_{\max}$ ) lze rozumět největší hodnotu poloměru, při níž nastává v ohýbaném materiálu trvalá deformace. Po odlehčení je tedy ohyb již trvalý. Materiál se deformuje elasticky, dokud není dosaženo maximálního poloměru ohybu. Velikost této hodnoty lze zjistit podobně jako u  $R_{\min}$  pomocí odvozeného vztahu:

$$R_{\max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot \sigma_e} \quad [\text{mm}] \quad (2.16)$$

kde: E ... modul pružnosti ohýbaného materiálu [MPa]

### 2.3.2 Výpočet rozvinutí ohybu a stanovení odpružení [16]

Pro stanovení správného rozvinutého tvaru je třeba znát poloměr neutrální osy, jehož velikost je závislá na druhu materiálu a jeho houževnatosti, velikosti deformace, tloušťce plechu apod...

Poloměr neutrální osy se stanovuje s ohledem na poměr poloměru ohybu a tloušťky plechu.

- Ohyb s velkým poloměrem ohybu  $\frac{R_0}{s} \geq 12$

$$\varrho = R_0 + \frac{s}{2} \quad [\text{mm}] \quad (2.17)$$

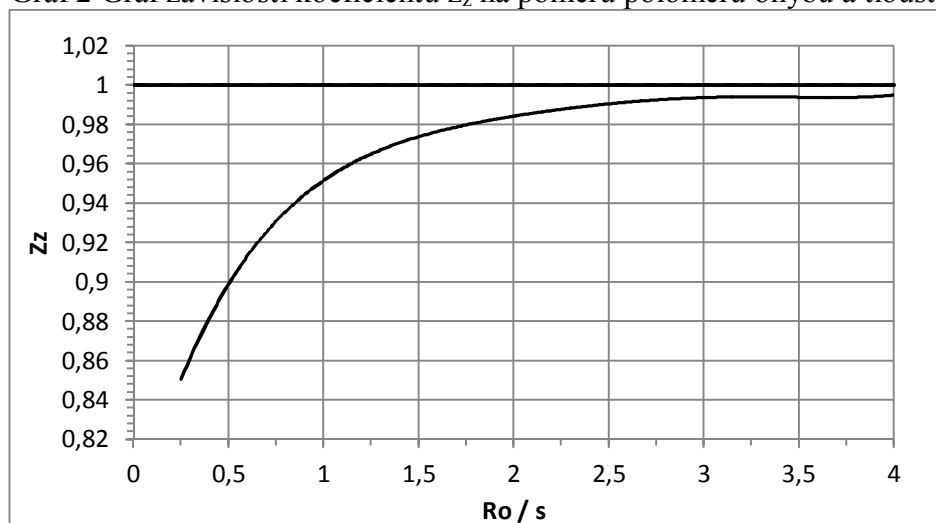
- Ohyb s malým poloměrem ohybu  $\frac{R_0}{s} \leq 6$  s ohledem na deformaci materiálu

$$\varrho = \left(R_0 + \frac{s}{2}\right) \cdot z_z \cdot z_r \quad [\text{mm}] \quad (2.18)$$

kde:  $z_z$  ... koeficient ztenčení [-]

$z_r$  ... koeficient rozšíření prvotního průřezu  $z_r = 1,0 \div 1,09$  [-] – určí se podle velikosti ohýbané šířky – pro zadaný typ plechu  $z_r = 1,0$

Graf 2 Graf závislosti koeficientu  $z_z$  na poměru poloměru ohybu a tloušťky [16]



- Určení rozvinuté délky – rozvinutá délka se stanovuje součtem všech délek rovných úseků součástí a všech rozvinutých délek ohybů. Délka ohybu se stanoví vztahem:

$$l_0 = \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot \varrho = \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot (R_0 + x \cdot s) \text{ [mm]} \quad (2.19)$$

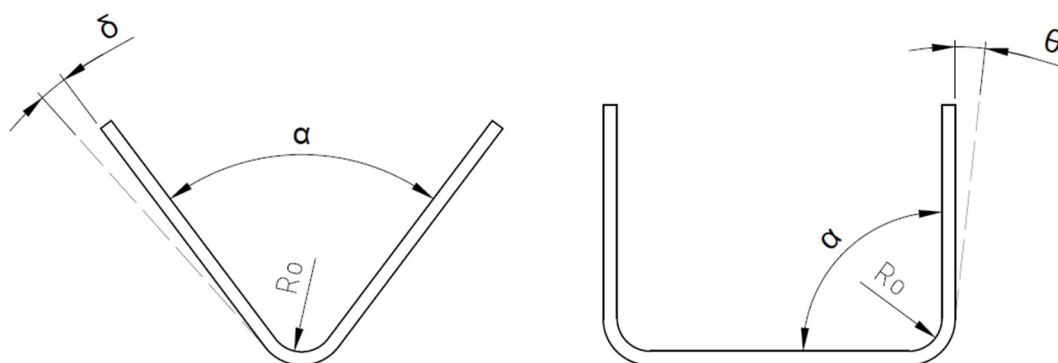
kde:  $\gamma = 180 - \alpha$  [°]  
 $x$  ... posunutí neutrální osy [-]

- Velikost ztenčení „ $\Delta s$ “ materiálu po ohnutí lze stanovit pomocí vztahu:

$$\Delta s = s - s_1 = \frac{s^3}{4 \cdot (2 \cdot R_0 + s)^2} \text{ [mm]} \quad (2.20)$$

kde:  $s_1$  ... tloušťka materiálu po ohnutí [mm]

- Při výpočtu odpružení je třeba brát ohled na druh ohybu. Lze rozlišovat ohyb tvaru „V“ nebo ohyb tvaru „U“ (obr. 37).



Obr. 37 Schéma odpružení [16]

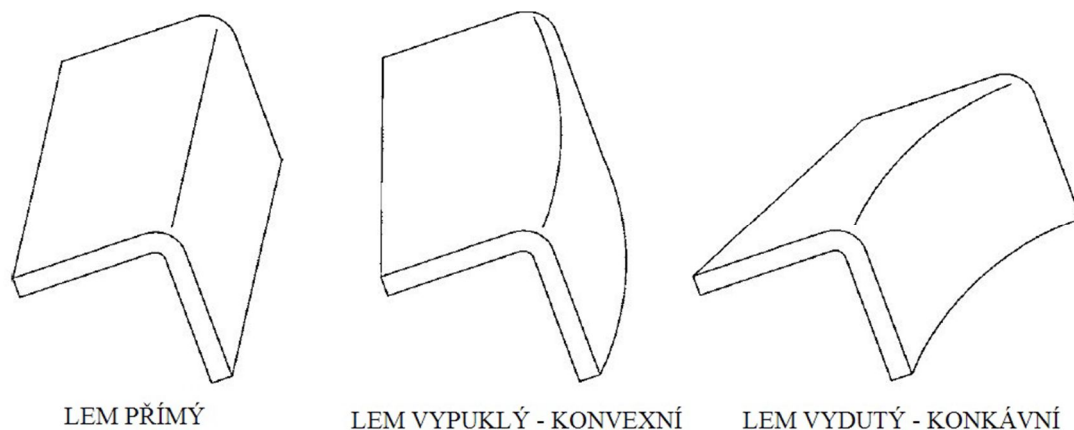
Pro výpočet teoretické hodnoty úhlu odpružení pro jednotlivé druhy ohybů, lze využít odvozených vztahů nebo použít experimentálně zjištěných hodnot z tabulky (viz tab. 5) pro jednotlivé druhy materiálů. Velikost odpružení je závislá na velikosti úhlu a poloměru ohybu a rovněž na druhu a tloušťce materiálu.

Tab. 5 Orientační hodnoty odpružení [26]

Materiál		R <sub>0</sub> /s	
		0,8 ÷ 2	nad 2
Ocel	do 320 MPa	1°	3°
	320 ÷ 400 MPa	3°	5°
	nad 400 MPa	5°	7°
Mosaz	měkká	1°	3°
	tvrdá	3°	5°
Hliník		1°	3°

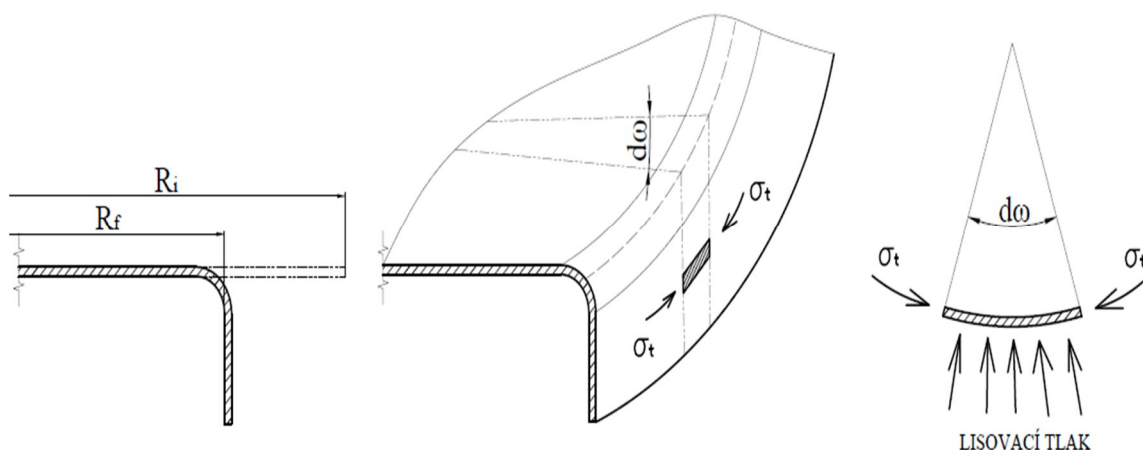
### 2.3.3 Ohýbání - lemování [16], [21], [34]

Lemování je způsob ohýbání okraje plechu, jehož výsledkem je lem. Většina lemů má funkci zpevnění plechového dílce. Využití lemu může být rovněž z dekorativních nebo bezpečnostních důvodů. Nejčastější ohyby jsou přímé, které se běžně používají například v klempířských aplikacích. U přímého lemu obvykle nedochází k žádnému nežádoucímu přeskupování materiálu. V případě tvarových lemů (obr. 38) často dochází k vyvozování napjatosti v oblasti lemu, což má za následek určitou deformaci (dle charakteru lemu).



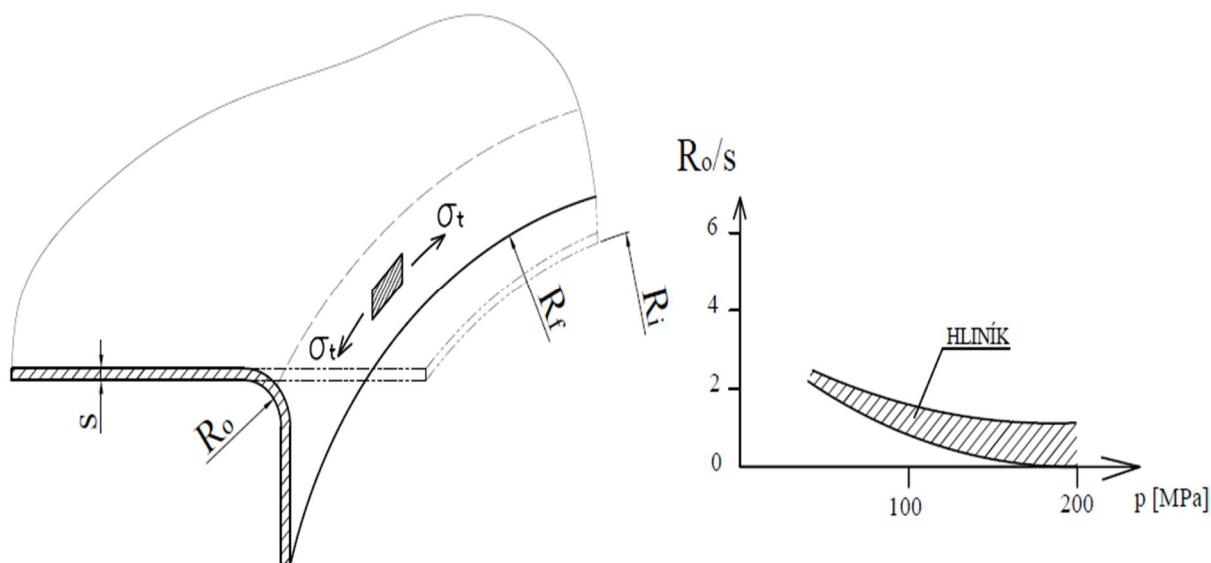
Obr. 38 Základní typy lemů [21]

Výroba vypuklého lemu je obvykle problematická, protože zde vzniká přebytek materiálu. Jelikož platí, že poloměr  $R_i$  (obr. 39) okraje polotovaru je větší než poloměr výsledného lemu  $R_f$ , dochází k přetvoření v podélném směru obrysové křivky – často vzniká nežádoucí zvlnění materiálu. Zvlnění plechu je vyvoláno vneseným tangenciálním napětím  $\sigma_t$ . V případech, kdy nedochází ke zvlnění materiálu, může nastat napěchování materiálu a změna tloušťky plechu. Pokud je lem vyráběn pomocí lisování nepevným nástrojem, lze občas zvlnění potlačit zvýšením lisovacího tlaku. V případech, kdy vlny nelze potlačit je pak nutno zvlnění manuálně vyklepat (případně roztáhnout) nebo konstrukčně upravit nástroje, případně vytvořit technologická opatření na vyráběném dílci. Stabilita plechu při výrobě lemu je závislá na kvalitě materiálu, tloušťce, konečném poloměru  $R_f$ , lisovacím tlaku a poměru délky lemu před ohnutím a poloměru okraje rozvinu.



Obr. 39 Schéma napjatosti ve vypuklém lemu [16]

Analogicky je při výrobě lemu vydutého (konkávního) vyvozeno napětí tahové (obr. 40) podél křivky lemu. Materiál je v oblasti lemu natahován a dochází k postupnému zmenšování tloušťky plechu. V okamžiku, kdy napjatost dosáhne kritických hodnot, dojde k vzniku trhlin případně k roztržení celého lemu. Vzniku defektů lze zabránit konstrukčním odladěním nástrojů nebo mezioperačním tepelným zpracováním. V krajních případech požadovat upravení lemu na plynulejší (větší poloměr). Důležitým faktorem je kvalita začištění hrany lemu. Pokud hrana budoucího lemu obsahuje trhliny, přispívá to k následnému roztržení ještě před dosažením kritických napětí.



Obr. 40 Schéma napjatosti u vydutého lemu [16]

Z hlediska této technologie je nejjednodušší typ lemu přímý (obr. 41). Lemování probíhá podle běžného principu ohýbání plechu. Při tváření nepevným nástrojem je ohybová síla dána celkovou plochou lemu. Doporučenou minimální výšku lemu lze stanovit ze vztahu:

$$h_{min} = R_o + 5 \cdot s \text{ [mm]} \quad (2.21)$$

Pro rozvinutý tvar lze využít specializovaného softwaru nebo empiricky odvozeného vzorce:

$$H = h - 0,43 \cdot R_o - 0,215 \cdot s \text{ [mm]} \quad (2.22)$$

kde:  $h$  ... výška lemu (obr. 41) [mm]

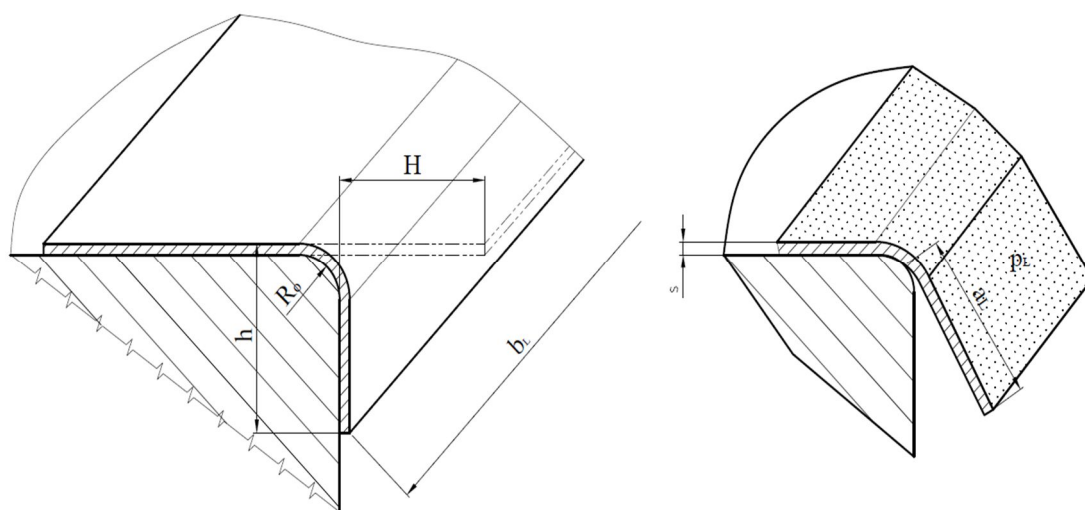
Potřebnou sílu pro správné olemování lze určit pomocí vztahu:

$$F_L = a_L \cdot b_L \cdot p_L \text{ [N]} \quad (2.23)$$

kde:  $a_L, b_L$  ... rozměry přímého lemu (obr. 41) [mm]

$p_L$  ... tlak působící na lem [MPa]

Obdobným výpočtem pak lze stanovit lemovací sílu u tvarových lemů.



Obr. 41 Lisování přímého lemu [16]

## 2.4 Metody výroby lemu a prolisů

Lisování plechu je v dnešní době často používaným způsobem výroby a zpracování plechových dílů. V této problematice lze nalézt celou řadu různých typů nástrojů. Lze se setkat od klasických pevných, typu razník a matrice až po netypické, u kterých bývá jedna část nástroje nahrazena určitým médiem (kapalina, výbuch, pryž apod.) Mezi méně tradiční technologie lisování patří metody jako je metoda Guerin, Wheelon, Triform a Marform.

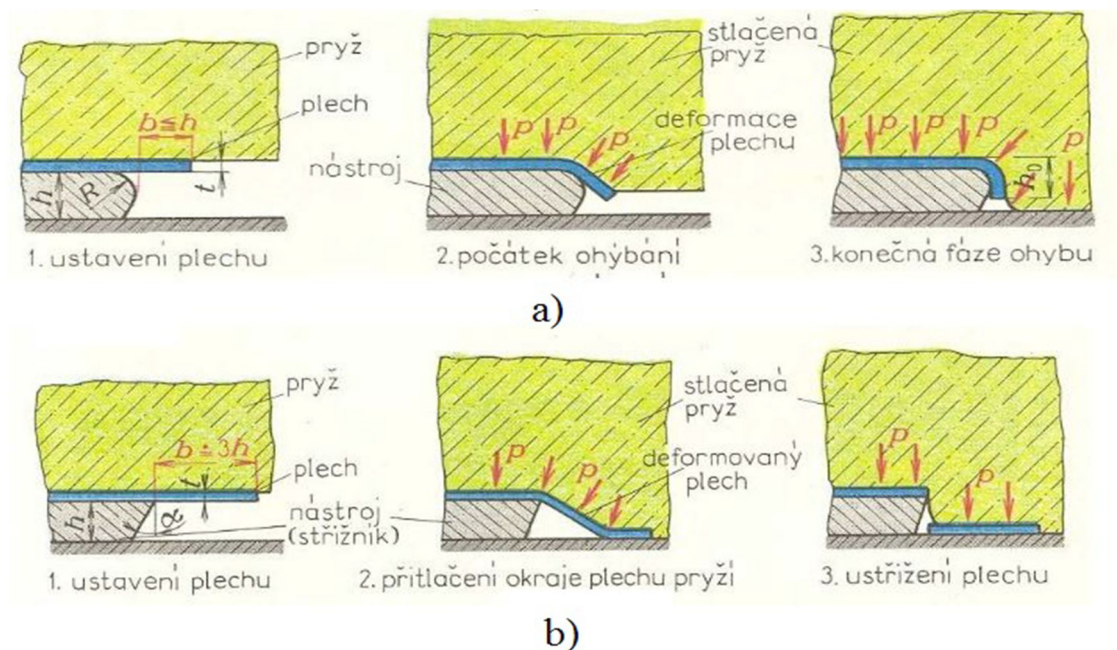
### 2.4.1 Metoda Guerin [16], [35], [36]

Při metodě Guerin se využívá elastického chování polyuretanových desek o dané tuhosti, nalepených v ocelovém kontejneru. Do těchto desek je následně vtlačován lisovník, na kterém je umístěn a zafixován polotovár lisovaného dílce. Při zvolení vhodného tlaku pryž obteče celý nástroj a zároveň přitlačí polotovár do tvaru nástroje.

Pomocí téhle metody lze provádět následující operace:

- lisování resp. lemování (obr. 43a),
- stříhání (obr. 43b),
- prostřihování otvorů

Metoda je určena převážně pro tenké plechy do 1,5 mm (často ze slitin hliníku). Pryž je při lisování šetrná k povrchu vylisku a nezanechává tak zjevné škrábance na povrchu dílce. Výhodou téhle metody je rovnoměrné rozložení tvářecího tlaku po ploše vylisku a nízké pořizovací náklady nástrojů (oproti běžným lisovacím nástrojům). Nevýhodou je postupné opotřebení pryže a nutnost její výměny.



Obr. 43 Princip lisování a stříhání metodou Guerin [36]

Tvrdosti pryží jsou voleny podle charakteru lisovací operace a lze tak rozlišovat pryže:

- pro operaci lisování/lemování – 45 ÷ 60 Sh
- pro operaci stříhání – 75 ÷ 85 Sh

Měrný tlak nepevného prostředí „ $p_p$ “ (polyuretanu) lze stanovit z empirického vzorce:

$$p_p = 10 \cdot (s + 0,5) \text{ [MPa]} \quad (2.24)$$

Síla pro ustrížení:

$$F_s = S_p \cdot p_p \text{ [MPa]} \quad (2.25)$$

kde:  $S_p$  ... plocha průřezu elastického prostředí [ $\text{mm}^2$ ]

Z obrázku 43b je patrné, že při operaci stříhání pomocí metody Guerin je třeba mít dostatečný přídavek pro ostřížení, jelikož je třeba zajistit přidržení nejvzdálenější části polotovaru. Protože okraj polotovaru je přitlačen pryží, dochází se zvyšujícím se tlakem k postupnému dotlačení plechu směrem k střížné hraně. Takto přidržovaný materiál se postupně natahuje a ztenčuje. Po překročení meze pevnosti se materiál v místě střížné hrany (koncentrátor napětí) utrhne. Lze tedy říci, že se jedná z větší části spíše o utržení než o prosté ustrížení. Střížná plocha vzniklou touto metodou je méně kvalitní a je třeba dalšího opracování.



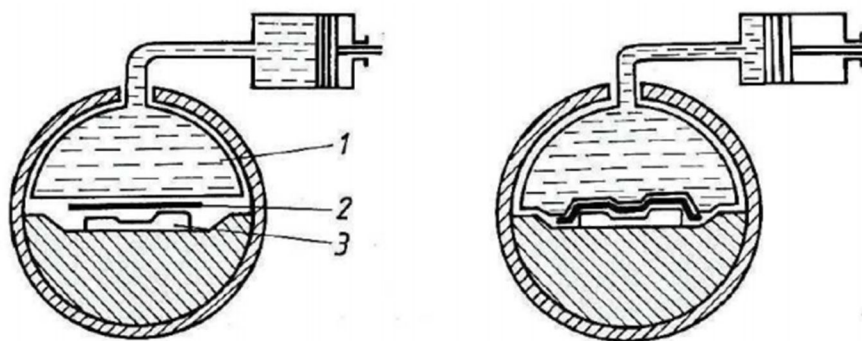
#### 2.4.2 Metoda Wheelon [36], [38], [39], [25]

Metoda, která je velmi podobná metodě Guerin. Namísto pryžových desek se zde používá pryžového vaku s tlakovým médiem (kapalina). Zařízení se často díky možnostem výrazně vyšších tlaků než u metody Guerin skládá z masivně bandážované tlakové komory (obr. 44) a dvou pracovních stolů (van), které do této komory zajíždí. Okolí nástrojů ve vaně lisu bývá obvykle vyskládáno pomocnou pryží, která snižuje opotřebení vaku. U metody Wheelon je však třeba při návrhu nástrojů brát zřetel na ostré hrany, které by mohli vést k poškození resp. zničení vaku (pracná a nákladná oprava).

V první fázi lisování je nástroj vložen do jedné z lisovacích van (dle rozměrů nástroje – rozdílná hloubka van). Po ustavení nástroje je umístěn polotovar výlisku na nástroj. Okolí nástroje obvykle nezůstává zbytečně prázdné, ale kvůli prodlužování životnosti pryžového vodního vaku, se nástroj vhodně obkládá pomocnými pryžovými bloky tak, aby byl vak vtlačován pouze do prostoru s nástrojem. Po vychystání je celá plocha lisovací vany zakryta krycími pryžovými pláty, které rovněž snižují opotřebení kapalinového vaku. Následně je na ovládacím zařízení lisu vhodně nastavena velikost lisovacího tlaku. Lisovací tlak by měl být volen s ohledem na komplikovanost tvaru výlisku, druh materiálu a jeho tepelné zpracování, případně provést dvě a více operace lisování s použitím nejprve nižšího a následně vyššího tlaku. Dnešní lisy umožňují lisovat s tlaky 800 bar a více.



Obr. 44 Kapalinový lis ŽDAS [37]



Obr. 45 Schéma lisování [18]

1 – kapalina, 2 – rozvin, 3 – nástroj

Po zvolení lisovacího tlaku je vana lisu zasunuta do pracovního prostoru s kapalinovým vakem, kde následně proběhne lisovací proces. Tlaková kapalina působí konstantním tlakem (obr. 45) ve všech místech polotovaru, což vede k přimknutí plechu k tvaru lisovacího

nástroje. Po vylisování je vana vysunuta z lisu, odstraněny pryžové pláty a výlisek je vyjmut a předán k případnému dalšímu zpracování.

Metoda je využívána pro širokou škálu materiálů, jako jsou např. hliníkové slitiny, nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli a rovněž titanové slitiny. Časté uplatnění má v automobilovém a leteckém průmyslu pro výrobu různých typů prolisů, lemů, žeber a tvarových ploch. Metoda umožňuje lisovat až do teplot 425 °C s použitím žáruvzdorných ohraných materiálů a vybavení lisu. Pro tuto metodu lisování lze využít i lisy pro technologii Flexform, která je rozdílná pouze z hlediska konstrukce nástrojů (obsahuje přidržovací resp. vtahovací přílošku).

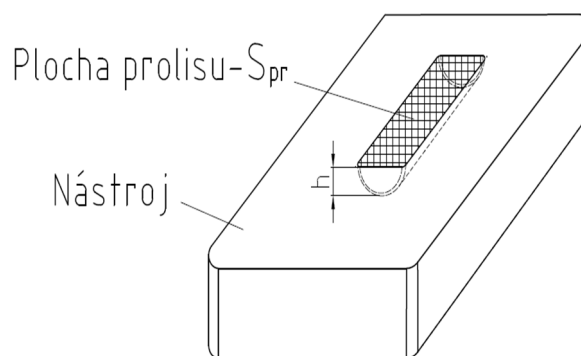
U výlisků se často vyskytují různé typy uzavřených prolisů (charakter tažení), které mohou mít význam od technologického či konstrukčního až po dekorativní účely. Tyto prolisy je pak nutno zohlednit do lisovacího tlaku nebo síly. Velikost lisovací síly pro zhotovení prolisu lze stanovit dle vztahu:

$$F_{pr} = k_w \cdot S_{pr} \text{ [N]} \quad (2.26)$$

kde:  $k_w$  ... odpor materiálu [MPa]

$S_{pr}$  ... plocha prolisu (obr. 46) [mm<sup>2</sup>]

Z hlediska geometrie prolisu je nutné hlídat jeho hloubku. Prolisy pak lze rozlišovat na mělké (ražení) nebo hluboké. Tato skutečnost podstatně ovlivňuje velikost členu  $k_w$ . Pro hliníkové slitiny a mělké prolisy je  $k_w = 150$  MPa, pro hluboké prolisy  $k_w = 350$  MPa.



Obr. 46 Plocha prolisu [25]

Práci potřebnou pro zhotovení prolisu lze pak stanovit jako:

$$A_{pr} = F_m \cdot h_p = \frac{F_{pr} \cdot h_p}{2} \text{ [J]} \quad (2.27)$$

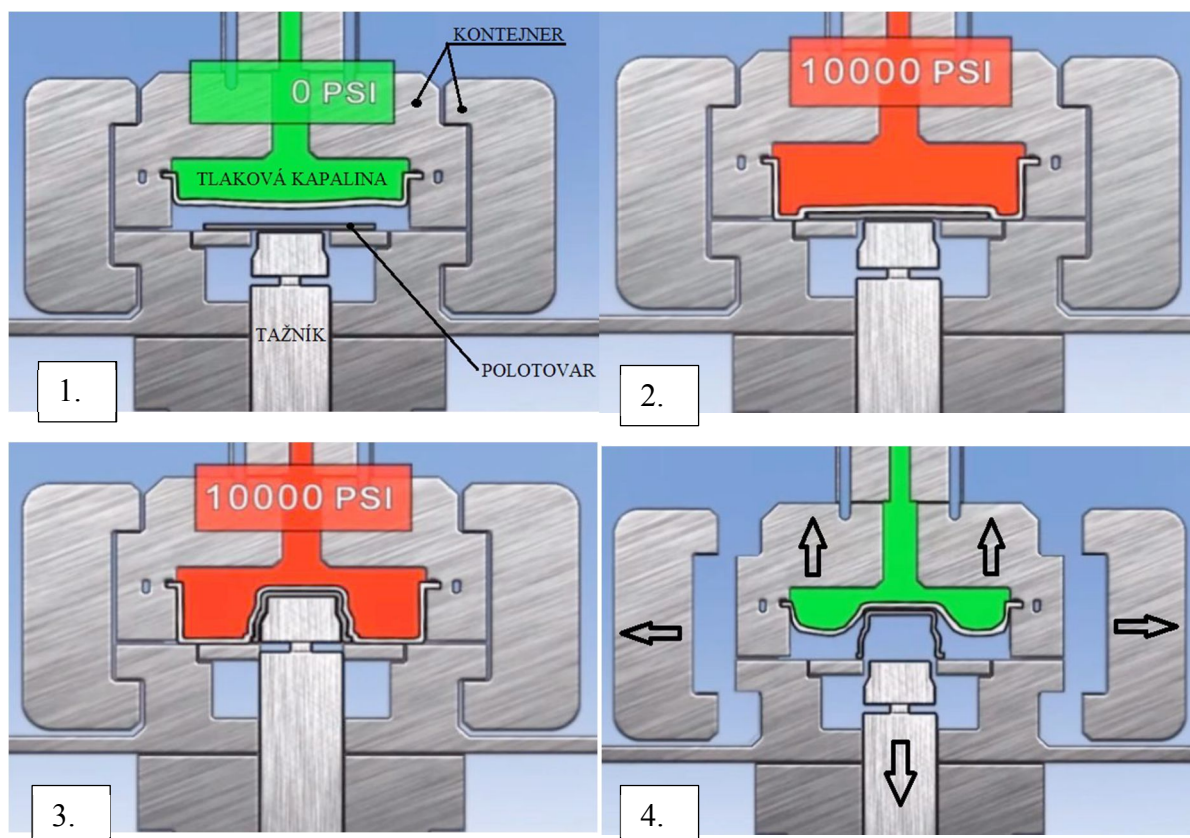
kde:  $F_m$  ... střední hodnota lisovací síly

$h_p$  ... hloubka prolisu (obr. 44) [mm]

#### 2.4.3 Metoda Triform [40], [41], [42], [43]

Moderní metoda, která je podobná metodě Wheelon, avšak lze provádět hluboké tažení. Metoda Triform je schematicky zobrazena na obr. 47. V první fázi je pracovní prostor silně bandážovaného kontejneru natlakován pomocí tlakového média v pryžovém vaku. Ve druhé fázi dochází k vtlačení tažníku do média, čímž vznikne precizní přilnutí plechu k nástroji. Po vylisování je pracovní prostor uvolněn, kontejner se rozloží (poháněno strojem) a výlisek vyjme. Doba trvání celého procesu se pohybuje přibližně 20 s. Dokončovací (klempířské) práce již obvykle nejsou potřebné. Lisy mohou pracovat v režimu pro tažení nebo pouze jako kapalinový lis pro lisování vakem (Wheelon). Výhodou této metody je jednoduchá obsluha a údržba, následována rovněž vysokou produktivitou práce, která je způsobena krátkým lisovacím cyklem. Triform nejčastěji nachází své uplatnění v leteckém a vesmírném průmyslu.

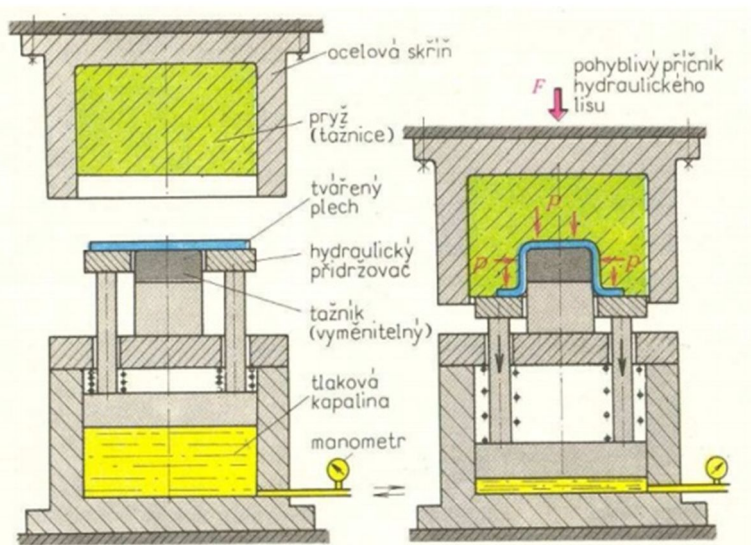




Obr. 47 Schéma tažení metodou Triform [43]

#### 2.4.4 Metoda Marform [12], [36], [44]

Metoda Marform (obr. 48) je svou podstatou podobná metodě Triform, avšak namísto kapalinového vaku je zde využito pryže (podobně jako u Guerinu). Plech je nejprve sevřen mezi hydraulický přidržovač a pryž v lisovacím kontejneru. Zvyšováním tlaku se tažník začne postupně vtlačovat do polotovaru a zároveň je polotovar přidržován hydraulickým přidržovačem, který postupně klesá. Tažník je u této metody statický. Aby nedocházelo k velkému opotřebení pryže, je důležité, aby její výška činila alespoň trojnásobek výšky výtažku. Metoda se hodí pro tváření ocelových plechů do tloušťky 1 mm a hliníkových plechů do tloušťky 2 mm. Z hlediska sériovosti pro malé a střední série.



Obr. 48 Tažení metodou Marform [12]

### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ VÝROBY

Dílec (obr. 49) je z plechu o síle 0,5 mm a hliníkové slitiny 2024 Al-Clad ve finálním stavu tepelně zpracovaném na stav T3. Stříhat a lisovat se bude materiál ve výchozím stavu „O“ - žíhaný na měkko. Žebro je ve finální sestavě spojeno s hlavním nosníkem křídla a potahovým plechem za pomoci nýtů. Otvory pro nýty bývají zhotoveny až při sestavování ručně na rozměření, proto na ně nebude brán ohled při vystřihování rozvinutého tvaru dílce. Na dílci lze dále nalézt 3 technologické otvory  $\phi 4,1$  mm, 2 otvory vyztužené lemem pod úhlem  $45^\circ$  se stanovenou výškou 5 mm a několik sférických prolisů. Prolisy jsou z hlediska technologičnosti kvůli zabránění zvlnění ploché části dílce po lisování (vtážením materiálu do prolisů se materiál „vypne“). Obvodové lemy dosahují výšky 15 mm. V místě náběžné hrany je lem odlehčen vybráním. Poloha prolisů vychází z přechozího odladění. Zvolený typ žebra se používá na obou stranách křídla – vyrábí se tedy v levém i pravém provedení. Nástroj pro vystřihování lze použít pouze jeden. Nástroj pro vylišování tvaru musí být v uspořádání levý/pravý. Kvůli požadavkům na pracoviště, vysokou jakost střížné plochy, ale zároveň figurující malou sériovost, bude jako výchozí technologie pro vystřížení rozvinutého tvaru zvolena technologie přesného stříhání se zaoblenou hranou. Rozvinutý tvar je součástí výkresu dílu a proto není nutné jej vytvářet. Zaoblené rohy výstřížku jsou rovněž pro zvolenou technologii příznivé. Lisování konečného tvaru bude provedeno metodou Wheelon. Zadávací série je v maximálním množství 1 000 ks za rok. V konečném výsledku bude zhodnoceno doporučení resp. vhodnost použitých technologií.



Obr. 49 Náběžné žebro – vyráběný díl

#### 3.1 Technologičnosti konstrukce a postup výroby dílu [1], [2], [45], [26], [22], [23], [26]

Každý díl vyráběný určitou metodou musí splňovat kritéria, která stanovují, zda je vůbec možné zvolenou metodu výroby použít. Při nedodržení technologických požadavků je často nutné požadovat konstrukční úpravu dílce nebo změnu technologie. Obvykle se posuzují parametry, jako jsou:

##### ✓ **Vhodnost materiálu**

Materiál 2024 Al-Clad je typ slitiny hliníku, mědi a hořčíku (dural) skupiny 2000. Skupina 2000 je určena pro tváření zastudena. Skládá se z jádra ze slitiny 2024 a plátovací vrstvy ze slitiny 1230 (99,3 % Al – viz tab. 1). Plátovací vrstva o tloušťce  $1,5 \div 5$  % tloušťky jádra poskytuje ochranu jádra proti korozi. Pro tloušťky do 0,8 mm se tato vrstva pohybuje mezi 4-5% tloušťky jádra. Rozvinutý tvar bude vystřížen z materiálu žíhaného na měkko, u kterého se dosahuje meze pevnosti  $R_m \leq 207$  MPa a meze kluzu  $R_{p0,2} \leq 96$  MPa. Materiál je vhodný pro zvolenou technologii.

##### ✓ **Dosahovaná jakost a přesnost**

Jak již bylo zmíněno – přesné stříhání je zvoleno kvůli zvýšené jakosti střížné plochy bez nutnosti dodatečného opracování. Dosahovaná drsnost  $R_a = 0,4 \div 0,8$  je

dostačující. Stříháním se zaoblenou hranou lze docílit stupně přesnosti IT 9 ÷ IT 11, což je vyhovující.

✓ **Minimální průměr otvoru a minimální vzdálenost od okraje**

Aby bylo zamezeno vzniku deformace výstřižku, je nutné zkontrolovat díl, zda neobsahuje otvory, které jsou příliš blízko sebe, blízko okraje nebo nejsou příliš malého průměru. Díl obsahuje 3 malé otvory  $\phi 4,1$  mm a 2 velké otvory pro olemování.

Minimální velikost kruhového otvoru musí splňovat kritérium:

$$\frac{d_{min}}{s} \geq 1 \quad [-]$$
$$\frac{4,1}{0,5} = 8,2 > 1$$

Nejmenší vzdálenost mezi stříhanými otvory je 11,2 mm, nejmenší vzdálenost otvorů od okraje výstřižku dosahuje hodnoty 17,3 mm. Z uvedených zjištění vyplývá, že hodnoty vzdáleností otvorů mezi sebou a od okraje dílce jsou více než 20x vyšší než tloušťka plechu. Lze tedy říct, že díl je po této stránce v pořádku i bez ověřovacích vztahů.

✓ **Minimální poloměr ohybu**

Zjištění teoretického minimálního poloměru ohybu je nezbytně nutnou součástí posouzení technologičnosti, aby bylo zabráněno vzniku vad spojených s ohýbáním plechu při lemování.

$$R_{min} = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 \text{ mm}$$

Nejmenší poloměr ohybu dílu je 1,6 mm. Kritérium je splněno.

✓ **Minimální výška lemu**

Aby bylo dosaženo kvalitního ohnutí lemu, musí být splněno kritérium:

$$h_{min} = R_o + 5 \cdot s$$
$$h_{min} = 1,6 + 5 \cdot 0,5 = 4,1 \text{ mm}$$

Výška kolmých lemů je dle výkresové dokumentace dílce 15 mm, výška lemů u lemovaných otvorů pod 45° musí dosahovat dle normy (AEN 1237) 5 mm. Délky lemů vyhovují.

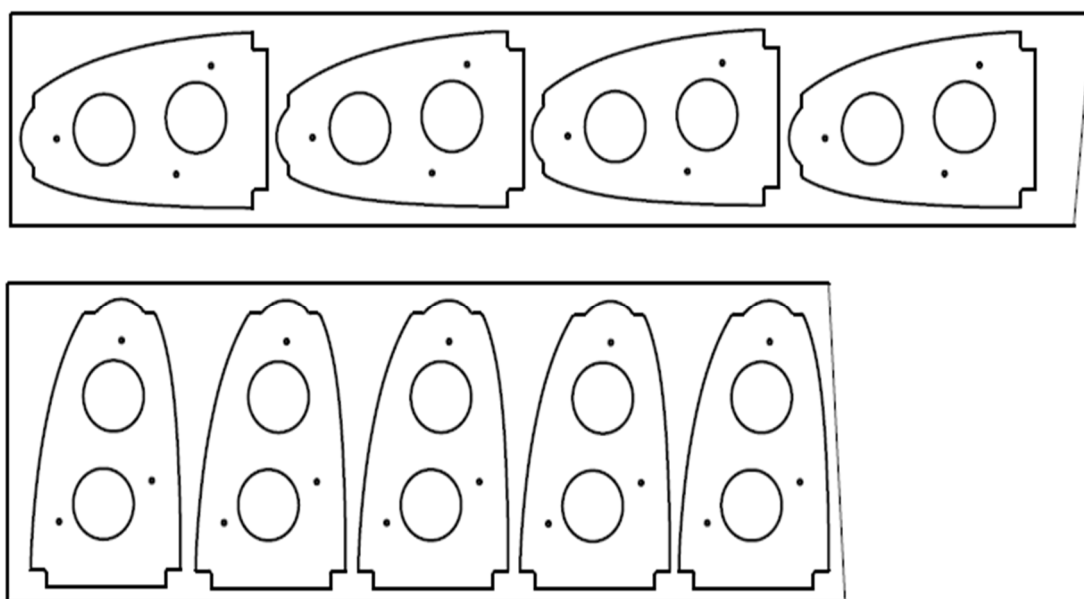
Snahou nového postupu výroby je snížení počtu operací a zapracování nových pracovišť. Nový postup výroby vede ke snížení pracnosti a výrobních časů na výrobu jednoho dílce. Hlavní změny budou spočívat především ve využití nástroje pro přesné stříhání, čímž se značně sníží čas výroby rozvinutého tvaru. Další změny budou spočívat ve využití nové konstrukce lisovacího nástroje, která sníží pracnost konečných úprav a opět využití nového pracoviště. Sled jednotlivých operací výroby viz tab. 6.

Tab. 6 Sled výrobních operací

Pořadí	Druh operace
1	Výdej materiálu - stav "O"
2	Stříhání se zaoblenou hranou
3	Kontrola mezioperační
4	Kapalinový lis - lisování lemů
6	Umývárna před tepelným zpracováním
7	Tepelné zpracování – na stav T3
8	Kontrola tepelného zpracování
9	Kapalinový lis - kalibrace tvaru
10	Klempíř – konečná úprava
11	Kontrola tvrdosti
12	Kontrola mezioperační
13	Odmašťování
14	Lakování
15	Značení a konečná kontrola

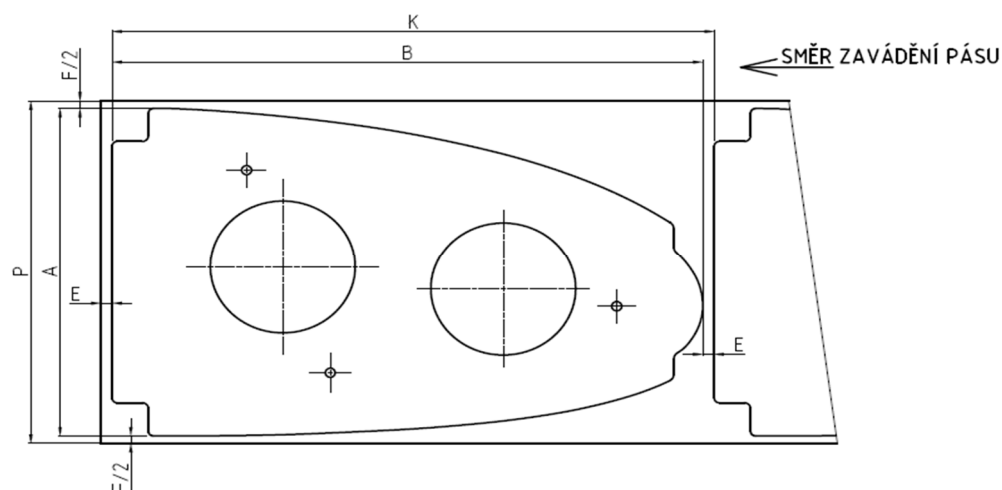
### 3.2 Návrh rozložení výstřížků na plechu a nástřihového plánu [1], [46], [47], [48]

Aby bylo dosaženo vhodného rozložení výstřížků na pásu plechu, je třeba stanovit vhodně okrajové přídatky a vzdálenosti mezi jednotlivými výstřížky. Správná volba přídatků má vliv na výslednou kvalitu výsledného výstřížku. Přídatky budou zvoleny dle doporučení normy. Součást bude vystřihována ze svitku nebo pásů plechu stanovené šířky. Pro výpočet optimální varianty budou posuzovány varianty rozložení dle obr. 49.



Obr. 49 Podélné a příčné rozložení výstřížků na pásu

Základní přídatky a vzdálenosti mezi jednotlivými výstřížky jsou znázorněny na obr. 50.

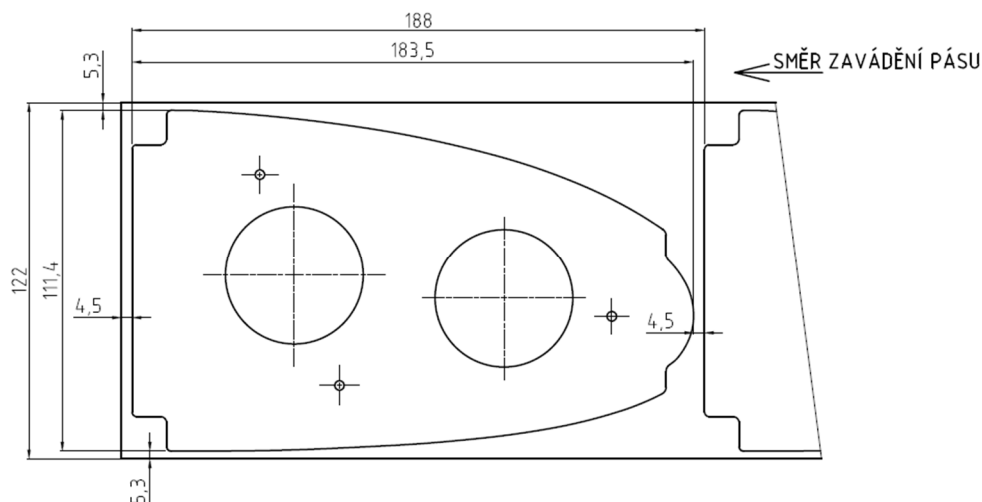


Obr. 49 Schéma přidavků

## A) Varianty ze svítku

### 1) Rozložení výstřižků – svitek – varianta 1

Ve variantě 1 budou výstřižky situovány souhlasně delší stranou ve směru zavádění pásu do stříhadla (obr. 50).



Obr. 50 Nástřihový plán – varianta 1

Obecné vztahy jsou odvozeny z obr. 50.  
Základní rozměry:

❖ velikost kroku:

$$K = B + E = 183,5 + 4,2 = 187,7 \Rightarrow 188 \text{ mm} \quad (3.1)$$

kde: B ... délka výstřižku [mm]

E ... šířka můstku – dle normy [mm]

❖ šířka pásu:

$$P = A + 2 \cdot \frac{F}{2} = 111,4 + 2 \cdot 5,25 = 121,9 \Rightarrow 122 \text{ mm} \quad (3.2)$$

kde: A ... šířka výstřížku [mm]

$\frac{F}{2}$  ... šířka okraje – dle normy [mm]

Minimální spotřeba materiálu:

$$L_{1,min} = K \cdot n_v = 189 \cdot 1\,000 = 189\,000 \text{ mm} = 189 \text{ m} \quad (3.3)$$

kde:  $n_v$  ... max. velikost série [ks]

Rozměr svitku varianty 1 pro velikost kroku  $K = 188 \text{ mm}$  - svitek bude navinut na bubnu o průměru  $D_b = 0,5 \text{ m}$ .

$$L_s = \frac{D_s^2 - D_b^2}{4 \cdot s} = \frac{D_s^2 - 0,5^2}{4 \cdot 0,0005} = 189 \text{ m} \quad \Rightarrow D_s = 0,793 \text{ m} \Rightarrow 0,8 \text{ m} \quad (3.4)$$

kde:  $D_s$  ... průměr svitku

Skutečná délka svitku bude  $L_s = 195 \text{ m}$

$$\text{Délka nevyužitého konce: } L_{odpad} = L_s - L_{1,min} = 195 - 189 = 6 \text{ m} \quad (3.5)$$

Využití materiálu svitku:

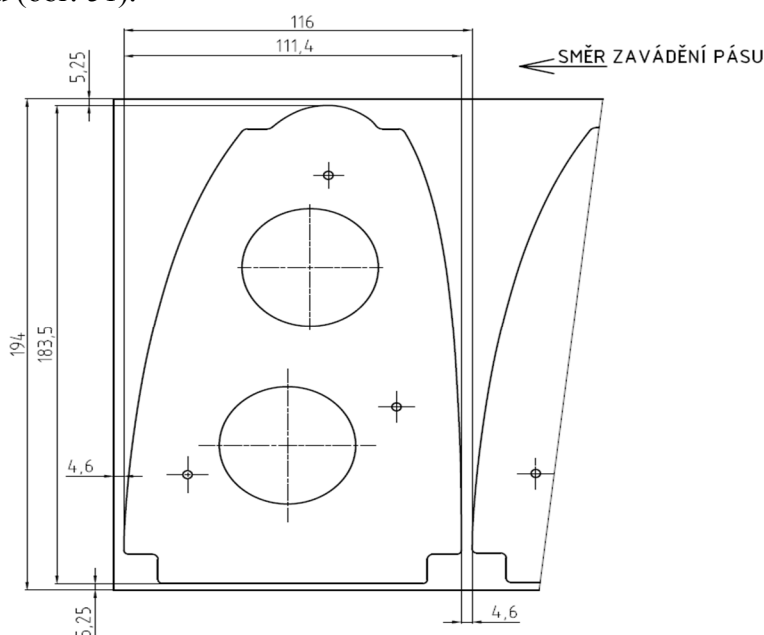
$$VM_{1;s} = \frac{n_v \cdot S_v}{S_{sv}} = \frac{1\,000 \cdot 16\,720,5}{195\,000 \cdot 122} = 0,7028 \quad \Rightarrow 70,28 \% \quad (3.6)$$

kde:  $S_v$  ... plocha výstřížku – změřeno v 3D modelu [ $\text{mm}^2$ ]

$S_{sv}$  ... plocha svitku [ $\text{mm}^2$ ]

## 2) Rozložení výstřížků – svitek – varianta 2

Ve variantě 2 budou výstřížky na pásu situovány kratší stranou souhlasně se směrem zavádění pásu (obr. 51).



Obr. 51 Nástřihový plán – varianta 2

Základní rozměry:

❖ velikost kroku:

$$K = B + E = 111,4 + 4,2 = 115,6 \Rightarrow 116 \text{ mm}$$

❖ šířka pásu:

$$P = A + 2 \cdot \frac{F}{2} = 183,5 + 2 \cdot 5,25 = 194 \text{ mm}$$

Minimální spotřeba materiálu:

$$L_{2,min} = K \cdot n_v = 116 \cdot 1\,000 = 116\,000 \text{ mm} = 116 \text{ m}$$

Rozměr svitku varianty 1 pro velikost kroku  $K = 116 \text{ mm}$  - svitek je navinut na bubnu o průměru  $D_b = 0,5 \text{ m}$ .

$$L_s = \frac{D_s^2 - D_b^2}{4 \cdot s} = \frac{D_s^2 - 0,5^2}{4 \cdot 0,0005} = 116 \text{ m} \Rightarrow D_s = 0,693 \text{ m} \Rightarrow 0,7 \text{ m}$$

Skutečná délka svitku bude  $L_s = 120 \text{ m}$

Délka nevyužitého konce:  $L_{odpad} = L_s - L_{2,min} = 120 - 116 = 4 \text{ m}$

Využití materiálu svitku:

$$VM_{2;s} = \frac{n_v \cdot S_v}{S_{sv}} = \frac{1\,000 \cdot 16\,720,5}{120\,000 \cdot 194} = 0,718 \Rightarrow 71,8 \%$$

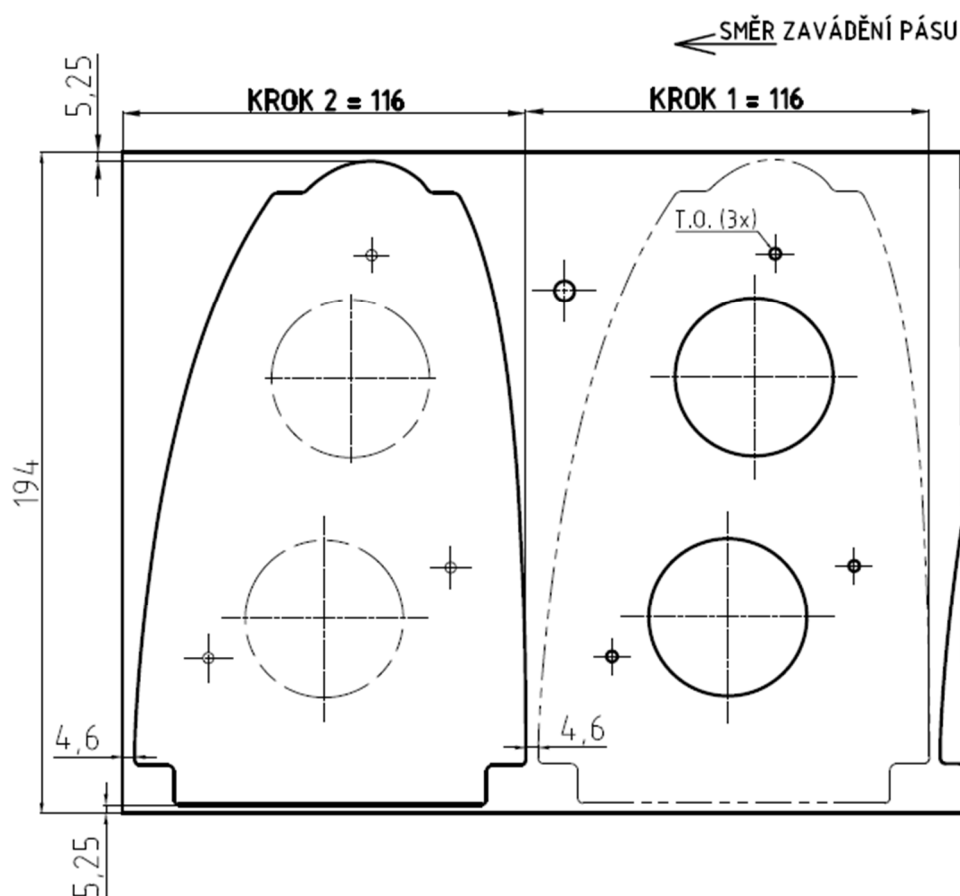
## B) Rozložení výstřížků na tabuli

Při volbě uspořádání na tabuli lze výstřížky orientovat delší i kratší stranou na pásy plechu, jejichž délka může dosahovat délky nebo šířky tabule. Tabule, ze které se budou pásy stříhat má dodávané rozměry 48" x 144" tj. 1 220 x 3 650 mm (rozměry tabule dle zdroje č. 47). Princip výpočtu je stejný jako v případě svitků. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Varianty uspořádání na tabuli

Var.	Uspořádání	Délka pásu x šířka x krok [mm]	Pásů z tab. [ks]	Kusů z pásu [ks]	Kusů z tab. [ks]	VM [%]
1	Podélné	3 650 x 122 x 188	10	19	190	71,34
2	Podélné	1 220 x 122 x 188	29	6	174	65,33
3	Příčné	3 650 x 194 x 116	6	31	186	69,84
4	Příčné	1 220 x 194 x 116	18	10	180	67,59

Pro zadaný počet výstřížků nejlépe vychází polotovary ze svitku dle varianty 2. Avšak s ohledem na prostory okolo lisu, nízkou sériovost, nedostupnost odvíjecího zařízení a přihlédnutím k budoucím rozměrům nástroje, bude zvolena varianta pásů z tabulí v uspořádání dle varianty 3. Procentuální využití zvolené varianty se zároveň příliš neliší od použití svitku a ztráty nebudou nijak velké. Výstřížky budou stříhány v pořadí dle obr. 52. Nejprve dojde k vystřížení velkých válcových a malých technologických otvorů. Součástí prvního kroku bude i vystřížení otvoru pro odpružený doraz. V druhém kroku budou dva technologické otvory využity pro zahledání pásu pomocí hledáček umístěných na střížníku a následně dojde k vystřížení obrysu.



Obr. 52 Nástřihový plán

Potřebný počet tabulí na sérii:

$$n_{t,s} = \frac{n_v}{n_{3,t}} = \frac{1\,000}{186} = 5,37 \Rightarrow 6 \text{ ks} \quad (3.7)$$

Kde:  $n_{3,t}$  ... počet výstřížku z tabule varianty 3 [ks]

Hmotnost tabulí:

$$\begin{aligned} m_{tab} &= n_{t,s} \cdot V_t \cdot \rho_{al} = 6 \cdot 3,65 \cdot 1,22 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2\,800 \\ m_{tab} &= 37,41 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.8)$$



kde:  $\rho_{al}$  ... hustota duralu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]  
 $V_t$  ... objem tabule [ $\text{mm}^3$ ]

Hmotnost všech výstřížků

$$m_{vc} = S_v \cdot s \cdot \rho_{al} \cdot n_v = 0,0167205 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 2\,800 \cdot 1000 = 23,41 \text{ kg} \quad (3.9)$$

Hmotnost odpadu:

$$\begin{aligned} m_o &= m_{tab} - m_{vc} = 37,41 - 23,41 \\ m_o &= 14 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.10)$$

### 3.3 Výpočet střížné síly a práce, specifikace lisu [50], [51], [52]

U stříhání se zaoblenou hranou dochází k nárůstu střížné síly kvůli zaobleným hranám stříhadel. Nárůst síly může být v rozsahu  $10 \div 30$  % oproti běžnému stříhání. Vypočtená síla tedy bude zvětšena na prostřední hodnotu, kterou udává literatura [30], [32] tj. 20 %. Délky střížných hran byly změřeny CAD softwarem.

#### ❖ Střížná síla 1 – stříhání vnějšího obvodu:

$$\begin{aligned} F_{stř,1} &= n \cdot L_o \cdot (s - h_s) \cdot 0,77 \cdot R_m = 1,3 \cdot (0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \cdot 525,2 \cdot 0,77 \cdot 207 \\ F_{stř,1} &= 21\,765,023 \text{ N} \end{aligned}$$

kde:  $L_o$ ... obvod tvarového střížníku (dle 3D softwaru) [mm]

Síla bude navýšena o zmíněných 20 %:

$$F_{stř,1,max} = 1,2 \cdot 21\,765,023 = 26\,118,028 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Střížná práce pak bude: } A_1 &= \lambda \cdot F_{stř,1,max} \cdot s = 0,75 \cdot 26\,118,028 \cdot 0,5 \\ A_1 &= 9\,794,261 \text{ J} \end{aligned}$$

#### ❖ Střížná síla 2 – stříhání kruhového otvoru $\phi 45$ :

$$\begin{aligned} F_{stř,2} &= n \cdot L_{45} \cdot (s - h_s) \cdot 0,77 \cdot R_m = 1,3 \cdot (0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \cdot 141,372 \cdot 0,77 \cdot 207 \\ F_{stř,2} &= 5\,858,654 \text{ N} \end{aligned}$$

kde:  $L_{45}$ ... obvod střížníku  $\phi 45$  [mm]

$$F_{stř,2,max} = 1,2 \cdot 5\,858,654 = 7\,030,385 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{Střížná práce pak bude: } A_2 &= \lambda \cdot F_{stř,2,max} \cdot s = 0,75 \cdot 7\,030,385 \cdot 0,5 \\ A_2 &= 2\,636,394 \text{ J} \end{aligned}$$

#### ❖ Střížná síla 3 – stříhání kruhového otvoru $\phi 8$ :

Střížník  $\phi 8$  je volen pro vystřížení otvoru pro odpružený doraz. Z toho důvodu u něj nebude navýšena střížná síla.

$$F_{stř,3,max} = n \cdot L_8 \cdot (s - h_s) \cdot 0,77 \cdot R_m$$

$$F_{stř,3,max} = 1,3 \cdot (0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \cdot 25,133 \cdot 0,77 \cdot 207$$

$$F_{stř,3,max} = 1\,041,547 \text{ N}$$

kde:  $L_8$ ... obvod střížníku  $\phi 8$  [mm]

$$\text{Střížná práce pak bude: } A_3 = \lambda \cdot F_{stř,2,max} \cdot s = 0,75 \cdot 1\,041,547 \cdot 0,5$$

$$A_3 = 390,580 \text{ J}$$

#### ❖ Střížná síla 4 – stříhání kruhového otvoru $\phi 4,1$ :

$$F_{stř,4} = n \cdot L_{4,1} \cdot (s - h_s) \cdot 0,77 \cdot R_m = 1,3 \cdot (0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \cdot 12,881 \cdot 0,77 \cdot 207$$

$$F_{stř,4} = 533,807 \text{ N}$$

$$F_{stř,4,max} = 1,2 \cdot 534,6 = 640,568 \text{ N}$$

kde:  $L_{4,1}$ ... obvod střížníku  $\phi 4,1$  [mm]

$$\text{Střížná práce pak bude: } A_4 = \lambda \cdot F_{stř,3,max} \cdot s = 0,75 \cdot 640,568 \cdot 0,5$$

$$A_4 = 240,213 \text{ J}$$

Celková střížná síla a práce je pak dána součtem jednotlivých dílčích střížných sil případně prací. Otvory  $\phi 45$  se na dílci vyskytují 2, otvory  $\phi 4,1$  jsou na dílci 3.

$$F_c = F_{stř,1,max} + 2 \cdot F_{stř,2,max} + F_{stř,3,max} + 3 \cdot F_{stř,4,max} \quad [\text{N}]$$

$$F_c = 26\,118,028 + 2 \cdot 7\,030,285 + 1\,041,547 + 3 \cdot 640,568 = 43\,141,849 \text{ N}$$

$$A_c = A_1 + 2 \cdot A_2 + A_4 + 3 \cdot A_4 = 9\,794,261 + 2 \cdot 2\,636,394 + 390,580$$

$$+ 3 \cdot 240,213$$

$$A_c = 16\,178,268 \text{ J}$$

Pro požadovanou operaci byl zadán výstředníkový lis výrobce Šmeral řady LEN s označením 40 C (obr. 53). Zadaný typ stroje je určený pro ohýbání, stříhání, mělké tažení, ražení apod. Výhodou stroje je možnost volby velkého množství zdvihů pomocí vestavěného dvouotáčkového elektromotoru. K přenosu lisovací síly je použito výstředníkového mechanismu, beranu a ojnice. Hřídel nesoucí výstředník se otáčí a po sepnutí lamelové spojky lisu, dojde k zapojení výstředníku a následnému převodu rotačního pohybu hřídele na přímočarý vratný. Lis má plynulou regulaci zdvihu, čímž se mění i průběh lisovací síly. Lis může pracovat v automatizovaném módu nebo s manuálním ovládáním pomocí pedálu. Ve firmě je lis



Obr. 53 LEN 40 C [49]

ovládán manuálně s ručním podáváním pásu plechu. Pro zvolenou velikost série není nutné pořízení dalších příslušenství. Základní parametry stroje uvádí tab. 8. Z velikosti maximální lisovací síly, kterou je schopen lis vynaložit je patrné, že lis bude operaci stříhání se zaoblenou hranou zvládat bez problémů. Rozměry pracovního stolu jsou rovněž dostačující.

Tab. 8 Základní rozměry lisu [1], [52]

Základní rozměry		
Výška	2 370	mm
Šířka	1 245	
Délka	1 585	
Hmotnost	4 500	kg
Lisovací parametry		
Jmenovitá síla	400	kN
Sevření	295	mm
Přestavitelnost zdvihu	8 - 95	
Přestavitelnost beranu	60	
Pracovní stůl		
Délka	660	mm
Šířka	530	
Beran		
Délka	400	mm
Šířka	250	

### 3.4 Určení polohy stopky

Určení polohy upínací stopky bude provedeno početně s kombinací výpočetního softwaru Autodesk Inventor, pro stanovení polohy těžiště obrysového střížníku obecného tvaru. Souřadnice jednotlivých střížných sil znázorňuje obr. 54.

Těžiště střížných sil v ose x:

$$x_s = \frac{F_{stř,1,max} \cdot x_1 + \dots + F_{stř,n,max} \cdot x_n}{F_c}$$

$$x_s = \frac{26\,118 \cdot 63,63 + 7\,812,5 \cdot (174,54 + 182,04) + 1\,041,5 \cdot 124,57 + 641,5 \cdot (141,54 + 188,04 + 210,54)}{44\,709}$$

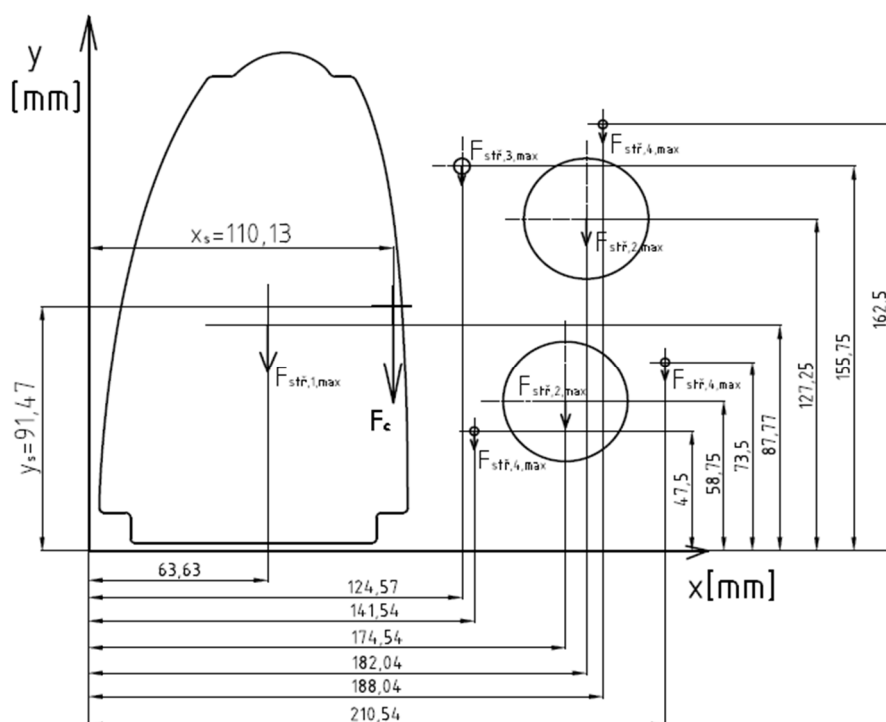
$$x_s = 110,13 \text{ mm}$$

Těžiště střížných sil v ose y:

$$y_s = \frac{F_{stř,1,max} \cdot y_1 + \dots + F_{stř,n,max} \cdot y_n}{F_c}$$

$$y_s = \frac{26\,118 \cdot 87,77 + 7\,812,5 \cdot (58,75 + 127,25) + 1\,041,5 \cdot 155,75 + 641,5 \cdot (47,5 + 73,5 + 162,5)}{44\,709}$$

$$y_s = 91,47 \text{ mm}$$

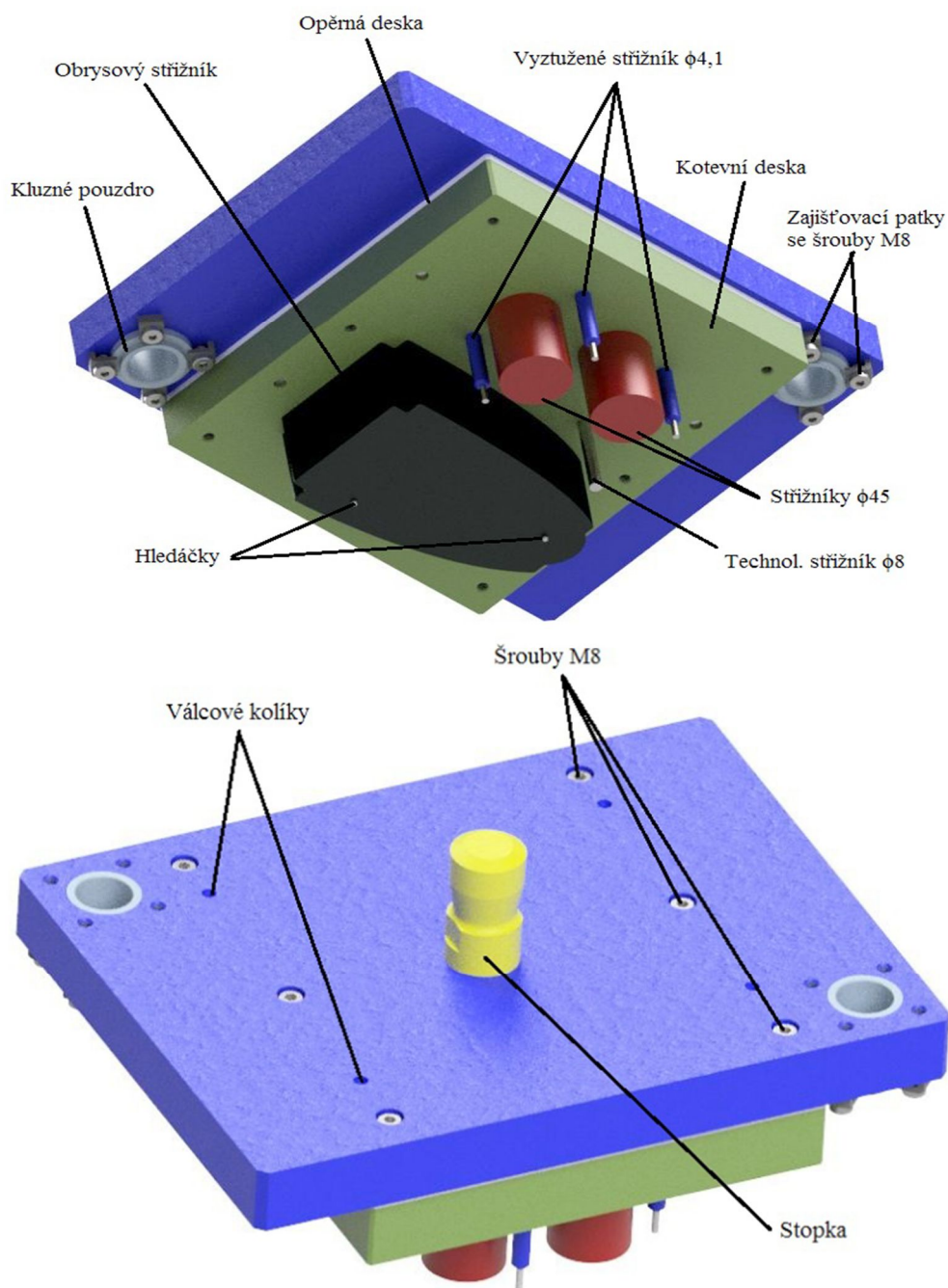


Obr. 54 Souřadnice těžiště

### 3.5 Popis střížného nástroje a kontrola nejmenšího střížníku [1]

Celková koncepce nástroje se sestává ze dvou hlavních polovin. Kvůli snaze dosáhnout minimálních pořizovacích nákladů je velké množství komponentů vybráno z katalogů dodavatelů, kteří se specializují na lisovací nástroje.

Horní polovina nástroje (obr. 55) je sestavena ze zakoupené upravené upínací desky. Upínací deska tvoří základnu pro přišroubování upínací stopky beranu lisu. Ve dvou rozích jsou vyvrtány otvory pro vložení kluzných samomazných pouzder. Okolo pouzder je několik závitových otvorů pro přišroubování čtyř patek pro zajištění kluzného pouzdra proti případnému vypadnutí. Pod upínací deskou je umístěna opěrná deska ze zušlechťeného opracovaného plechu, která slouží pro zachycení tlaku od střížníků během působení střížných sil, aby nedošlo k postupnému otláčování střížníků do upínací desky. Další část horní poloviny nástroje je kotevní deska, ve které jsou vsazeny jednotlivé střížníky v otvorech odpovídajících průřezu střížníků. Kotevní deska je sešroubována s upínací deskou pomocí šesti šroubů M8 a prokolíkována pomocí čtyř válcových normalizovaných kolíků. Střížníky kruhových průřezů jsou zajištěny proti vypadnutí pomocí osazení, které zapadá do kotevní desky. U tvarového/obrysového střížníku bylo pro upnutí použito rovněž obvodového osazení, které je vsazeno do vybrání v kotevní desce. Součástí obrysového střížníku jsou dva odstupňované otvory, ve kterých jsou umístěny hledáčky pro zahledání pásu plechu při stříhání obvodu dílu. Kruhové střížníky pro vystřížení tří malých otvorů  $\phi 4,1$  mm jsou navrženy jako vyztužené, aby nedošlo k jejich zlomení. Aby byl zajištěn krok při posunu pásu, byl přidán jeden technologický střížník  $\phi 8$  mm, sloužící pro vystřížení otvoru pro odpružený doraz umístěný ve vodící desce. Zbývající dva střížníky  $\phi 45$  mm jsou stejně jako střížník technologický navrženy jako monolitní (bez vyztužení). Podobně jako základní deska, kluzná pouzdra, stopka a další části, jsou válcové střížníky nakoupené od dodavatelů s následným nabroušením zaoblení o velikosti 0,13 mm.



Obr. 55 Horní část nástroje

Spodní část nástroje (obr. 56) je podobně jako část horní tvořena nakoupenou a upravenou základní deskou, na které je umístěna střížná skříň. Základní deska slouží pro upnutí spodní části nástroje ke stolu lisu. Obsahuje rovněž otvory pro průchod odpadu a výstřížků z nástroje. Do základní desky stolu jsou zároveň našroubovány čtyři přenášeční čepy pro manipulaci s nástrojem mimo lis. Ve stejném uspořádání jako v horní polovině nástroje, jsou v základní desce vyvrtány dva otvory pro nasazení vodících sloupků s několika závitovými otvory pro zajišťovací patky sloupků. Výše umístěná střížná skříň je složena ze střížnice, která je v přímém kontaktu se základní deskou. Protože nebylo při výpočtu střížné síly dosaženo (ani po zvětšení) vysokých hodnot, nebylo konstruováno bandážování či zasazení střížnice do základní desky. Střížná vůle byla zvolena dle doporučení literatury [30] na 0,025 mm. Otvory

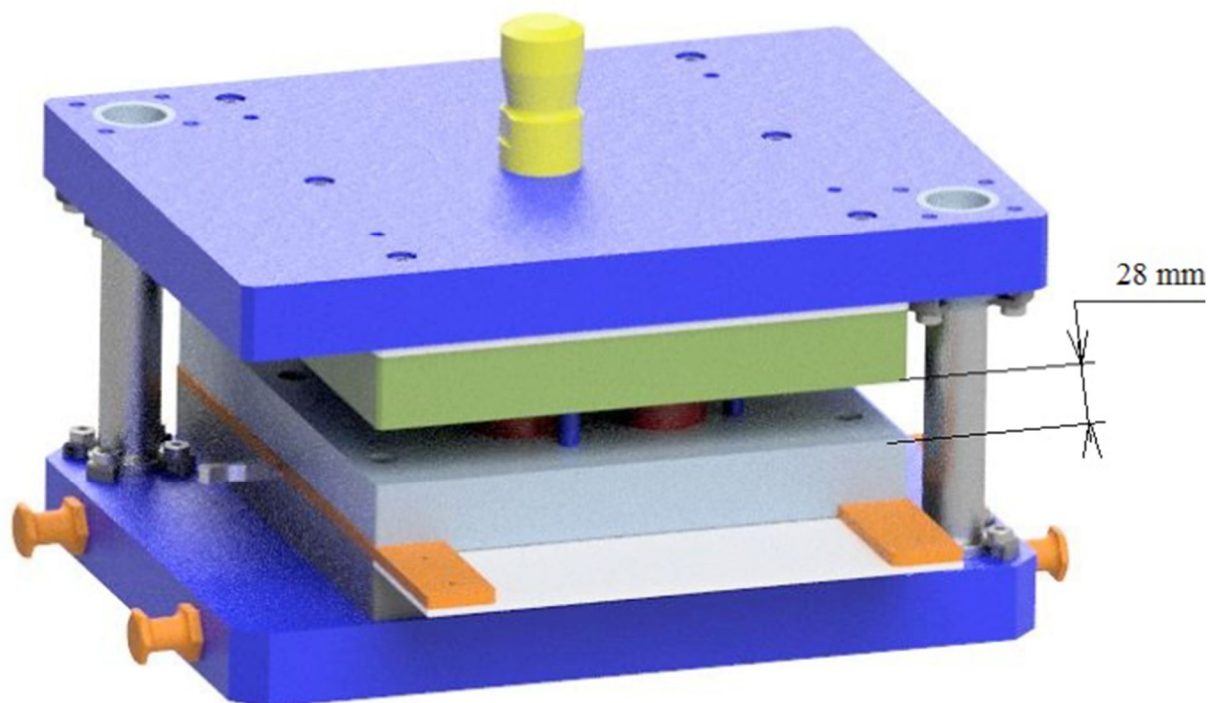
Diagram illustrating the components of a mechanical assembly, likely a mold or fixture, with labels in Czech:

- Kolíky
- Vodící deska
- Šrouby M8
- Zajišťovací patky se šrouby M8
- Vodící sloupky
- Závěsné čepy
- Podpěrný plech
- Vodící lišty
- Základní deska
- Načínací doraz
- Střížnice
- Šrouby M4
- Otvory pro odpad a výstřižky

Celkovou sestavu nástroje zobrazuje obr. 57. Výška nástroje v sevřeném stavu činí 209 mm. S ohledem na velikost sevření lisu, které činí 295 mm, bude nutné nástroj při použití podložit. Při sevřeném stavu nástroje je velikost mezery mezi kotevní a vodící deskou 28 mm. Střížník o nejmenším průřezu bude nutno pevnostně zkontrolovat na vzpěr. Jako nejšťihlejší



střižník byl stanoven technologický střižník o průměru 8 mm, jelikož ostatní jsou vyztuženy na 10 mm nebo dostatečně tuhé.



Obr. 57 Celková sestava nástroje

Pro kontrolu střižníku na vzpěr bude použit vztah pro výpočet kritické délky, který zahrnuje vedení ve vodící desce a vetknutí v kotevní desce.

$$l_{krit} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{n_b \cdot F_{stř,3}}} \quad [\text{mm}] \quad (3.11)$$

kde:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  MPa

$I$  ... kvadratický moment průřezu  $I = \frac{\pi \cdot d_s^4}{64}$  [mm<sup>4</sup>]

$d_s$  ... průměr střižníku [mm]

$n_b$  ... součinitel bezpečnosti  $n_b = 3$

$$l_{krit} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi \cdot 8^4}{64}}{3 \cdot 1\,041,547}} = 91,299 \text{ mm}$$

Kritická délka pro kontrolovaný střižník je přibližně třikrát větší než skutečná délka na nástroji při stříhu – střižník vyhovuje. Protože se však na nástroji vyskytuje ještě vyztužený střižník  $\phi 4,1$  mm, bude tento zkontrolován na případné otlacení dle vztahu pro normálové napětí:

$$\sigma_4 = \frac{F_{stř,4,max}}{S_o} = \frac{4 \cdot s \cdot 0,8 \cdot R_m}{d_4} \leq \sigma_{DOV} \quad [\text{MPa}] \quad (3.12)$$

kde:  $S_o$  ... plocha namáhaná na otlacení [mm<sup>2</sup>]

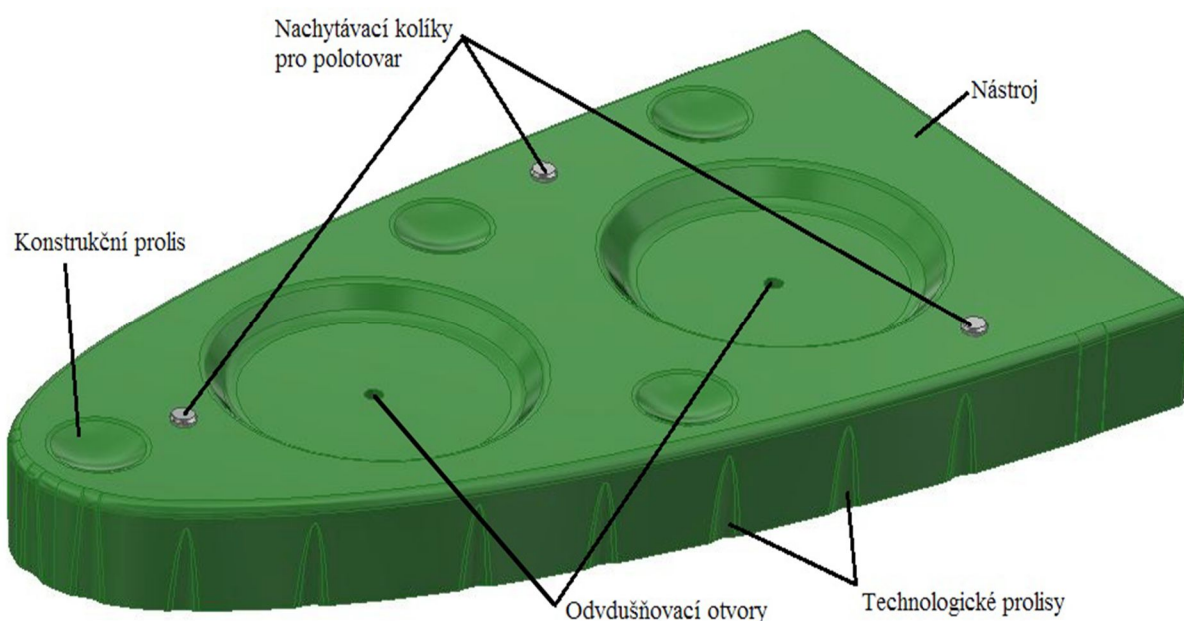
$\sigma_{DOV}$  ... dovolené tlakové napětí -  $\sigma_{DOV} = 1\,000\text{ MPa}$   
 $d_4$  ... průměr střížníku  $\phi 4,1\text{ [mm]}$

$$\sigma_4 = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 207}{4,1} = 80,781\text{ MPa} \leq 1\,000\text{ MPa}$$

Střížník  $\phi 4,1\text{ mm}$  vyhovuje na otláčení.

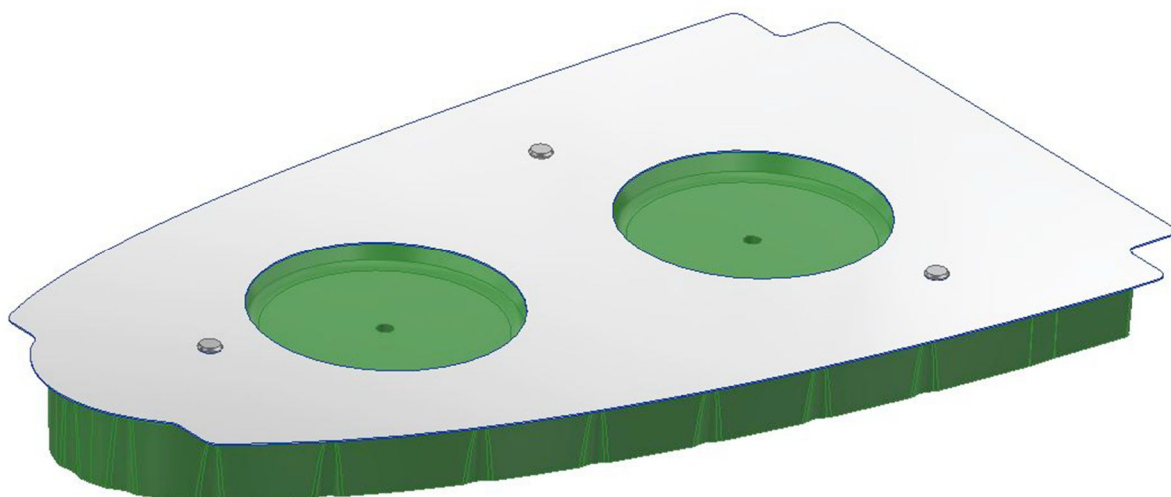
### 3.6 Lisování lemů [53]

Pro operaci lisování lemů byl zkonstruován nový nástroj pro kapalinový (vakový) lis Quintus QFC (viz příloha 1). Nástroj (obr. 58) se sestává z lisovníku, který je navržen z textitového polotovaru, dle vnitřní geometrie dílce a tří nakoupených kolíků, které jsou naklepány v místech lisovníku, které odpovídají poloze technologických otvorů  $\phi 4,1\text{ mm}$  na polotovaru. Z horní strany nástroje jsou dva kuželové otvory pro olemování otvorů a několik kulových důlků pro vylisování sférických prolisů. Ve středu kuželových otvorů byly navrženy odvědušňovací otvory. Na obvodových plochách bylo navrženo odpružení  $2^\circ$ . Součástí návrhu nového nástroje bylo rovněž zapracování problematiky lemování vypuklých lemů. Kvůli snížení pracnosti po lisování (vyklepávání zvlnění) byli na vnějších vypuklých lemech navrženy technologické prolisy tak, aby ve vrcholové sestavě nekolidovali s nýtovou řadou. Do těchto prolisů se během lisování vtáhne materiál, který by byl jinak vytlačen v podobě zvlnění. Tyto prolisy byly přidány i v místech s největší křivostí („nos nástroje“) i přesto, že část žebra je zde již konstrukčně odlehčena. Očekáváním technologických prolisů je napnutí lemů a tudíž zabránění vzniku vln. Nástroj musí být vyroben v levém i pravém provedení. Protože tvar nástroje má obecný charakter dle náběžné hrany křídla, bude nutno využít kooperační výroby na CNC stroji dle poskytnutých 3D dat.



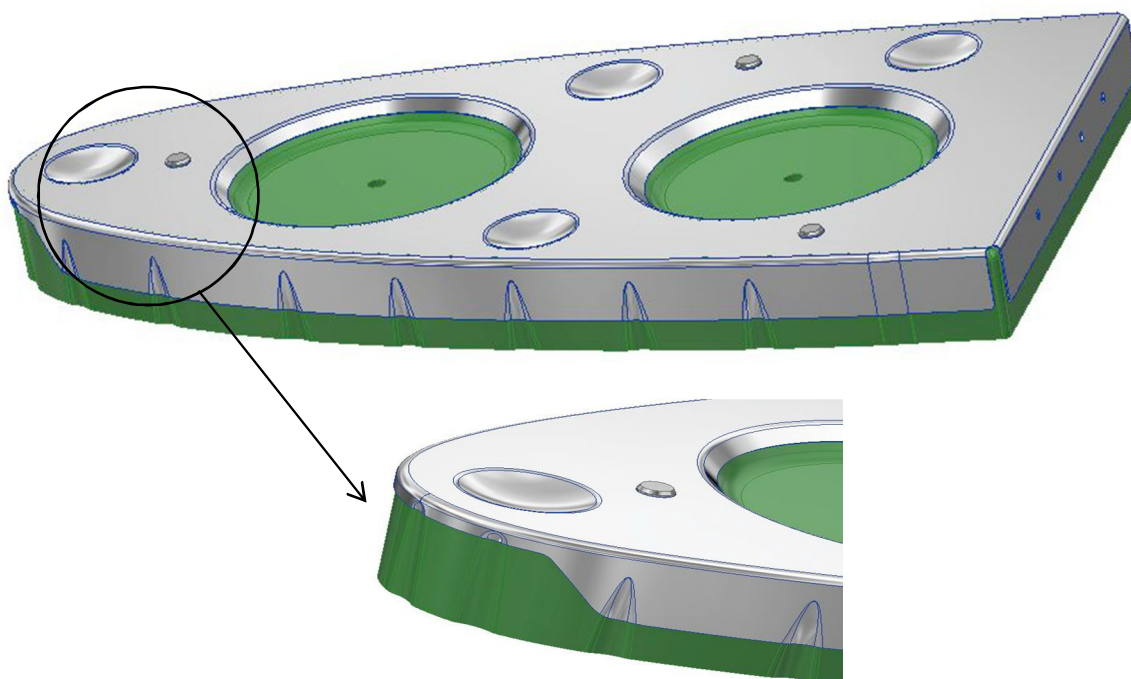
Obr. 58 Nástroj pro lisování lemů

Postup lisování na kapalinovém lisu Quintus QFC je následovný. Nejprve je třeba připravit lisovací vanu. Tento pracovní prostor je nutno vyskládat tuhou pryží sloužící pro snížení opotřebení vaku lisu. V lisovací vaně je ponechán pouze prostor pro umístění nástrojů. Na nástroje umístěné do stanovené polohy je položen polotovar, zafixován na technologické otvory  $\phi 4,1$  mm (obr. 59) a následně překryt krycími pryžovými pláty. V přichystaném uspořádání může obsluha spustit lisovací cyklus.



Obr. 59 Umístění polotovaru na nástroj

Zvolený typ lisu je schopen dosahovat tlaků až 800 barů. Velikost lisovacího tlaku bude nutno odladit dle výsledků lisování. V případě vzniku zvlnění bude nutné upravit hloubku technologických prolisů na nástroji. Výlisek v požadovaném tvaru je zobrazen na obr. 60, který představuje díl bez zvlnění a dobré zatečení plechu do všech stanovených míst na nástroji.



Obr. 60 Požadovaný výsledek lisování

- Výpočet sil působících na lemy od tlakového média:  
Plochy lemů „ $S_{Ln}$ “ budou stanoveny CAD softwarem dle 3D modelů. Hodnota tlaku nepevného prostředí bude navržena dle možností lisu na  $p_L = 700 \text{ bar} = 70 \text{ MPa}$ . Maximální lisovací síla lisu Quintus QFC dosahuje (dle přílohy 1) 170 MN. Volba vysokého lisovacího tlaku má rovněž vliv na snížení zvlnění.

Lemovací síla nepevného prostředí na obvodový vypuklý lem „ $F_{Lo}$ “:

$$F_{Lo} = S_{L1} \cdot p_L = 4\,812,529 \cdot 70 = 336\,877,030 \text{ N}$$

kde:  $S_{L1}$  ... plocha vnějších vypuklých lemů [ $\text{mm}^2$ ]

Lemovací síla na lem vnitřní – lemovaný otvor „ $F_{Lv}$ “:

$$F_{Lv} = S_{L2} \cdot p_L = 938,9 \cdot 70 = 65\,723,0 \text{ N}$$

kde:  $S_{Lv}$  ... plocha vnitřních lemů [ $\text{mm}^2$ ]

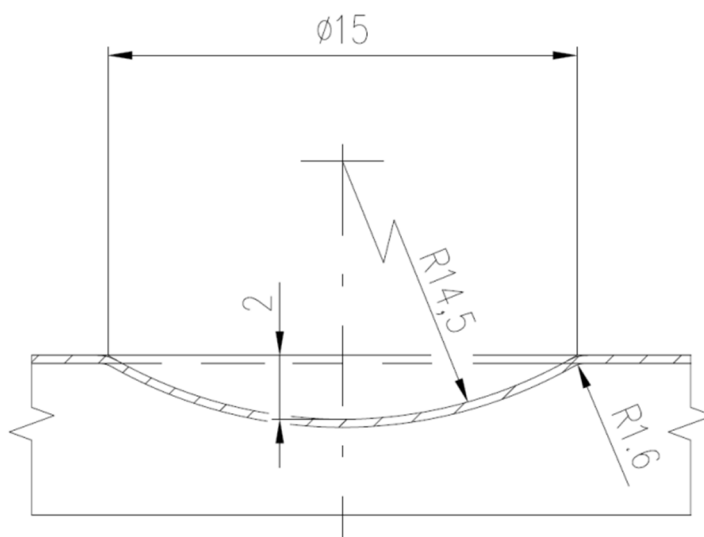
Lemovací síla působící na přímý lem:

$$F_{Lp} = S_{L3} \cdot p_L = 1\,335 \cdot 70 = 93\,450,0 \text{ N}$$

kde:  $S_{L3}$  ... plocha přímého lemu [ $\text{mm}^2$ ]

- Potřebná síla pro zhotovení sférického prolisu:  
Hodnota  $k_w$  byla zvolena 150 MPa (dle zdroje č. 25). Plocha prolisu bude stanovena dle obr. 61.

$$F_{pr} = k_w \cdot S_{pr} = 150 \cdot \frac{\pi \cdot 15^2}{4} = 26\,507,19 \text{ N}$$



Obr. 61 Tvar prolisu

#### 4 TECHNICKO - EKONOMICKÉ HODNOCENÍ [57]

Součástí technicko - ekonomického hodnocení navržených nástrojů, bude zhodnocení výrobních nákladů nástrojů. Pořizovací náklady budou stanoveny pouze jako součet cen za polotovary (resp. nakoupené díly), jelikož nejsou známi režijní náklady kooperačních strojů a pracovní režie zaměstnanců. Ceny polotovarů a dalších dílů stanovuje tab. 9 – ceny jsou uvedeny bez daně a následně i se základní hodnotou daně, která činí 21 %. Hodnoty jsou zjištěny dle informací z katalogu dodavatelů s patřičnou specializací. Většina dodavatelů uvádí cenu v EUR. Pro přepočet byl použit kurz 1 EUR = 25,50 Kč.

Tab. 9 Ceny polotovarů střížného nástroje [54], [55], [56]

Díl	Četnost [ks]	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]
Upínací deska	1	4 893,-	5 921,-
Základní deska		4 646,-	5 621,-
Kotevní deska		2 032,-	2 459,-
Podpěrná deska		520,-	629,-
Střížnice		4 439,-	5 371,-
Stopka		619,-	749,-
Podpěrný plech		90,-	109,-
Vodící deska		2 032,-	2 459,-
Střížníky (všechny)	-	12 713,-	15 383,-
Sloupky	2	3 400,-	4 114,-
Přichytka sloupku (včetně šroubů)	8	216,-	261,-
Přichytka pouzdra (včetně šroubů)		241,-	292,-
Vodící lišta	2	318,-	385,-
Závěs	4	1 798,-	2 176,-
Vodící pouzdro	2	1 566,-	1 895,-
Spojovací materiál (šrouby, kolíky, ...)	-	228,-	276,-
<b>Celkem</b>		<b>39 751,-</b>	<b>48 100,-</b>

Pořizovací cena polotovarů byla stanovena na 39 751 Kč bez DPH. S ohledem na potřebné opracování a tepelné zpracování některých dílů lze předpokládat, že celková cena nástroje poroste v řádech desítek tisíc. S ohledem na vyšší počet střížných nástrojů, které by bylo potřeba pro vícečetné díly na letadle, by výroba střížných nástrojů byla neekonomická i přesto, že zhotovení polotovarů by bylo rychlejší. Střížný nástroj proto není doporučen. Firma by měla hledat jiné řešení výroby rozvinutého polotovaru.

Hodnotu polotovaru pro lemovací/lisovací nástroj z textitové desky stanovuje tab. 10. Cena zvoleného polotovaru byla zjištěna od dodavatele materiálu.

Tab. 10 Cena polotovaru lisovacího nástroje [58]

Tloušťka desky [mm]	Cena/kg [Kč]	Polotovar [kg]	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]
30	150,-	0,73	110,-	133,-

Celková pořizovací cena lisovacího nástroje činí 110 Kč bez DPH. Nástroje budou vyrobeny ve dvojí provedení – levý a pravý. Cena za polotovary tedy činí 220,-. Je patrné, že

s nutností opracování CNC technikou a ručním začištěním, se bude reálná cena pohybovat mnohem výše. Celkovou cenu nástroje nelze stanovit bez znalosti režie kooperačních CNC strojů a časové náročnosti frézovacího programu. Lisovací nástroj však nebude činit pro firmu vysoké náklady. Odladění nové lisovací techniky by měla vzniklé investice brzy vrátit díky snížení výrobních časů.

## 5 ZÁVĚRY

Hlavním výsledkem práce je zjištění možnosti použití střížného nástroje se zaoblenou hranou pro výrobu rozvinutého tvaru náběžného žebra letounu SportStar RTC a návrh nového lemovacího nástroje. Nástroj byl navržen pro požadovaný výstředníkový lis LEN 40 C. Jeho pořizovací náklady (na polotovary) činí 39 751 Kč bez DPH. Konstrukční uspořádání nástroje vyšlo z technických výpočtů a s ohledem na pracovní prostory lisu. Výši pořizovací ceny střížného nástroje s ohledem na neznalost režii strojů však lze očekávat o několik desítek tisíc vyšší. Výroba rozvinutého tvaru zvoleného žebra by s požitím nástroje byla rychlejší, avšak z pohledu ekonomického by firma měla spíše provést investici do nového specializovaného pracoviště pro výrobu rozvinutých tvarů např. pořízení konturové CNC frézky. Lze předpokládat, že investice by byla vyššího charakteru, ale poskytovala by firmě možnost výroby kteréhokoliv dílce s možností rychlé úpravy geometrie a výroba rozvinutých tvarů by se tak stala mnohem pružnější. V případě že by firma nemohla uvolnit vyšší investici, by bylo rovněž variantou zakoupení stroje na leasing. V krajním řešení se pokusit rozvinuté tvary nechat vyrábět v kooperaci u leteckých firem, které pracoviště vlastní.

Pro druhou fázi výroby žebra byl navržen nový lemovací nástroj, který je určen pro kapalinový lis Quintus QFC. Navržený lis svou možností použití vysokých lisovacích tlaků umožní lepší vylisování dílu. Optimalizace nástroje zahrnuje rovněž užití korekcí na odpružení lemů a využití technologických prolisů pro zabránění zvlnění vnějších vypuklých lemů. Po odladění nástroje lze očekávat požadované snížení pracnosti dokončovacích klempířských prací, což povede rovněž ke zvýšení produktivity.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [59]

1. IVANČO, Radek. *Výroba postupového stříhadla*. Brno, 2017. Ročníkový projekt. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.
2. IVANČO, Radek. *Přípravky a nástroje: Návrh ohýbacího nástroje*. Brno, 2017. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ladislav Žák.
3. NAWAPON. L-410NG received European and American certificates. *Military and Commercial Technology* [online]. 2018, 2018(1) [cit. 2019-05-11]. Dostupné z <https://thaimilitaryandasianregion.blogspot.com/2018/01/l-410ng-received-european-and-american.html>
4. *AEN 2003: Kovové materiály*. Poslední verze. Kunovice: Evektor, c.
5. *AEN 5612: Výroba součástí a sestav*. Platné od 2017. Kunovice: Evektor, 2017.
6. *AEN 1237: Otvory kruhové vyztužené - úhel lemu 45°*. Platné od 2006. Kunovice: Evektor, 2006.
7. *AEN 1003: Technické výkresy pro stavbu letadel*. Platné od 2006. Kunovice: Evektor, 2006.
8. Frézování: Frézování kopírováním. *ELUC: Elektronická učebnice* [online]. ELUC [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1824>
9. SportStar RTC. *Evektor s. r. o.* [online]. Kunovice: Evektor, c [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/cz/sportstar-rtc>
10. Dural. *Ehlinik* [online]. Pardubice: Ehlinik, 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/dural>
11. VERY LIGHT 2-SEATER AIRCRAFT: SPORTSTAR RTC. *Aero expo: The online aeronautical exhibition* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.aeroexpo.online/prod/evektor-aerotechnik-as/product-171322-15101.html>
12. KUBÍČEK, Miroslav. Zvláštní způsoby tváření za studena. *Docplayer* [online]. Brno [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9186993-Zvlastni-zpusoby-tvareni-za-studena.html>
13. Technologie - Jak pracuje laserový řezací stroj?. *CHPS s. r. o.* [online]. Ústí nad Labem: CHPS, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/technologie>
14. Jak funguje vodní paprsek. *Flow - shape technologies group* [online]. Flow [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#basics>
15. Děrování a vysekávání plechů: CNC děrování, vystřihování a tvarové opracování plechu. *Prostor design: CNC zpracování plechu* [online]. Prachatice [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.prostor-design.cz/derovani-sekani-plechu/>
16. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.

17. Lisovací nástroje. In: *Waschina engineering* [online]. Chvalčov: Waschina engineering, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.washina.cz/galerie/35.html>
18. PAVÉZKA, Vladimír. *Progresivní technologie výroby tvářených součástí* [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13747/2009\\_BP\\_Pavezka\\_Vladimir\\_53779.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13747/2009_BP_Pavezka_Vladimir_53779.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Pavel Rumíšek.
19. GUILDI, Alfons. *Přistřihování a přesné stříhání*. Praha: SNTL, 1969. ISBN 04-209-69.
20. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
21. SUCHY, Ivana. *Handbook of die design*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6271-6.
22. Technologie plošného tváření - stříhání. *Technická universita Liberec: Fakulta strojní - Katedra strojírenské technologie - Odbor tváření kovů a plastů* [online]. Liberec: Technická universita Liberec [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/06.htm#064](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm#064)
23. FINDA, Luděk a Roman HALTUF. Akademie tváření: Stříhání. *MM* [online]. 2010, 2010(1), 1 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
24. KOČKA, Jiří. *Výroba konektoru* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/31348/2014\\_DP\\_Kocka\\_Jiri\\_126559.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/31348/2014_DP_Kocka_Jiri_126559.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ladislav Žák.
25. TSCHÄTSCHE, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. 1. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN 35-403-3216-2.
26. KAVKOVÁ, D. Stříhání. *SPŠ Třebešín* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://www.moodletr-ebesin.cz/pluginfile.php/9814/mod\\_resource/content/0/2.%20St%C5%99ih%C3%A1n%C3%AD.pdf](https://www.moodletr-ebesin.cz/pluginfile.php/9814/mod_resource/content/0/2.%20St%C5%99ih%C3%A1n%C3%AD.pdf)
27. *Ramseier normalien: Wo das besondere normal ist*. [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [http://ftp.ramseier-normteile.at/onlinekatalog\\_at\\_cz/3/#zoom=z](http://ftp.ramseier-normteile.at/onlinekatalog_at_cz/3/#zoom=z)
28. ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání - teoretický základ: Přesné stříhání*. 1. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická universita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3015-5.
29. KUČERA, Radek. *Výroba části univerzálního otvárače technologií přesného stříhání* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=84237](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84237). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Peterková.
30. BAREŠ, Karel. *Lisování*. Praha: SNTL, 1971. ISBN 04-234-71.
31. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha: SNTL, 1980. ISBN 04-234-80.

32. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje: skripta*. Brno: VUT Brno, 1992.
33. Technologie plošného tváření - Ohýbání. *Technická universita Liberec: Fakulta strojní - Katedra strojírenské technologie - Odbor tváření kovů a plastů* [online]. Liberec: Technická universita Liberec [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)
34. VALBERG, Henry S. *Applied metal forming: including FEM analysis*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-51823-9.
35. Zvláštní způsoby tváření: Metoda Guerin. *Strojírenství* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/zvltzn-zpsoby-tven.html>
36. Technologie plošného tváření - Tažení. *Technická universita Liberec: Fakulta strojní - Katedra strojírenské technologie - Odbor tváření kovů a plastů* [online]. Liberec: Technická universita Liberec [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm#095](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#095)
37. Kapalinový lis ŽĐAS. *LET - Aircraft Industries* [online]. Kunovice: LET - Aircraft Industries [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [http://www.let.cz/clanek\\_324\\_tvareni-plechu-a-profilu-z-al-slitin.html](http://www.let.cz/clanek_324_tvareni-plechu-a-profilu-z-al-slitin.html)
38. LASCOE, O. D. *Handbook of fabrication processes* [online]. 5. doplněné. Ohio: ASM INTERNATIONAL, 1998 [cit. 2019-05-11]. ISBN 0-87170-302-5. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=4PZxakNhJT0C&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
39. SPITLER, David, Jeff LANDTRIP, John G. NEE a David A. SMITH. *Fundamentals of tool design* [online]. 5th ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2003 [cit. 2019-05-11]. ISBN 08-726-3650-X. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=4Y3x5Fq9TJkC&pg=PA200&lpg=PA200&dq=verson+wheelon+process&source=bl&ots=z7EILdpmuM&sig=ACfU3U39dN7VDf7he9x-Kb3SkcF5m-AEdQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjWxIKv\\_NvhAhUzxcQBHYByB6MQ6AEwD3oECA YQAQ#v=onepage&q=verson%20wheelon%20process&f=false](https://books.google.cz/books?id=4Y3x5Fq9TJkC&pg=PA200&lpg=PA200&dq=verson+wheelon+process&source=bl&ots=z7EILdpmuM&sig=ACfU3U39dN7VDf7he9x-Kb3SkcF5m-AEdQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjWxIKv_NvhAhUzxcQBHYByB6MQ6AEwD3oECA YQAQ#v=onepage&q=verson%20wheelon%20process&f=false)
40. Triform to manufacture fluid cell sheet hydroforming press for aerospace supplier. *Aerospace manufacturing* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/triform-manufacture-fluid-cell-sheet-hydroforming-press-aerospace-supplier/>
41. Triform: Manufactured by Beckwood. *Beckwood corporation* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://beckwoodpress.com/triform-presses/deep-draw-sheet-hydroforming/16-10-7bd/>
42. Triform: MODEL 3678-6FC. *Beckwood corporation* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://beckwoodpress.com/triform-presses/fluid-cell-sheet-hydroforming/3678-6bd-fluid-cell-sheet-hydroforming-press/>
43. Triform Deep Draw Sheet Hydroforming Press Animation. In: *Youtube* [online]. 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=n-ht\\_5Ysurc](https://www.youtube.com/watch?v=n-ht_5Ysurc)
44. Metoda Marform. *Strojírenství* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/metoda-marform.html>

45. TATÍČEK, František, Martin KUBELKA a Tomáš PILVOUSEK. Akademie tváření: Technologičnost konstrukce v návrhu výstřižků. *MM* [online]. 2011, 2011(12), 1 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologicnost-konstrukce-v-navrhu-vystrizku.html>
46. GAJDOŠ. Technologie tváření kovů: Studijní opory - Technologie výroby I. - tváření. *Vysoké učení technické v Brně: Ústav strojírenské technologie - Odbor tváření kovů a plastů* [online]. Brno [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/5te\\_technologie\\_vyroby\\_I\\_tvareni\\_gajdos.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/5te_technologie_vyroby_I_tvareni_gajdos.pdf)
47. Letecké materiály: 2024 TEMPER 0 & T3,BARE & ALCLAD. *Primapol* [online]. Pletený Újezd [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.primapol.cz/produkty/letecke-materialy/>
48. Hustota pevných látek: Tabulka hustoty pevných látek. *Converter* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>
49. KŘIVÝ, Drahoš. *Návrh technologie komplexní výroby součástí "krytka PC skříně"* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38871](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38871). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Pavel Rumišek.
50. Lisy MA.TE. *TFM: Technologie Formowania Metali* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.tfm.pl/lcz/oferta/maszyny-do-obrobki-blach/prasy-mimosrodowe1/prasy-mate/>
51. Výstředníkové lisy se značkou TOMA. *MM* [online]. 2001, 2001(3), 1 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vystrednikove-lisy-se-znackou-toma.html>
52. LEN 40 C: Šmeral. *Fermat* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.fermatmachinery.com/pouzite-stroje/lis/excentricky-do-100-t/len-40-c-cs-142243/>
53. Data Sheet - Fluid Cell Type QFC 0.7 x 1.8-800 - 1400. *Quintus technologies* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://quintustechnologies.com/knowledge-center/data-sheet-fluid-cell-type-qfc-0-7-x-1-8-800-1400-us/>
54. STACK Shop: Normalizované díly pro tvářecí nástroje. *STACK NORMALIEN* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.strack.de/de/shop/>
55. Ceník obrobené nástrojové oceli. *Nástrojové oceli* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.nastrojove-oceli.com/katalog/cenik.pdf>
56. Spojovací materiál. *Killich: spojovací materiály* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://eshop.killich.cz/eshop/spojovaci-material/>
57. Daň z přidané hodnoty. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Da%C5%88\\_z\\_p%C5%99idan%C3%A9\\_hodnoty](https://cs.wikipedia.org/wiki/Da%C5%88_z_p%C5%99idan%C3%A9_hodnoty)
58. Textitové desky. *Labara* [online]. Velká Bíteš [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.labara.cz/cs/izolanty/pevne/desky/145-textitove-desky>
59. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$F_{stř}$	Střížná síla	[N]
$L$	Délka střížné hrany	[mm]
$A$	Střížná práce	[J]
$F_{stř, max}$	Maximální střížná síla	[N]
$F_c$	Celková střížná síla	[N]
$F_{1 \dots n}$	Jednotlivé střížné síly	[N]
$R_{min}$	Minimální poloměr ohybu	[mm]
$R_{max}$	Maximální poloměr ohybu	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
$R_o$	Poloměr ohybu	[mm]
$H$	Délka rozvinutého lemu	[mm]
$F_L$	Lemovací síla	[N]
$F_s$	Síla pro utržení při stříhání pryží	[N]
$S_p$	Plocha průmětu polyuretanu	[mm <sup>2</sup> ]
$F_{pr}$	Síla pro vylisování prolisu	[N]
$A_{pr}$	Práce pro vylisování prolisu	[J]
$F_m$	Střední hodnota síly pro tvorbu prolisu	[N]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_a$	Střední aritmetická hodnota drsnosti	[μm]
$IT$	Stupeň přesnosti	[-]
$K$	Velikost kroku	[mm]
$B$	Délka výstřížku	[mm]
$E$	Velikost můstku	[mm]
$F$	Celková velikost okraje	[mm]
$P$	Šířka pásu	[mm]
$L_{1, min}$	Minimální spotřeba materiálu varianta 1 - svitek	[m]
$L_s$	Délka svitku	[m]
$D_b$	Průměr bubnu svitku	[m]
$D_s$	Průměr svitku	[m]
$L_{odpad}$	Délka odpadu svitku	[m]
$VM_{1,s}$	Využití materiálu varianty 1 - svitek	[%]
$S_v$	Plocha výstřížku	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{sv}$	Plocha svitku	[mm <sup>2</sup> ]
$L_{2, min}$	Minimální spotřeba materiálu varianta 2 - svitek	[m]
$VM_{2,s}$	Využití materiálu varianty 2 - svitek	[%]
$V_t$	Objem tabule	[mm <sup>3</sup> ]
$L_o$	Obvod tvarového výstřížku	[mm]
$F_{stř,1}$	Střížná síla tvarového střížníku	[N]
$F_{stř,1,max}$	Střížná síla tvarového střížníku zvětšená o 20 %	[N]
$F_{stř,2}$	Střížná síla kruhového střížníku $\phi 45$ mm	[N]
$F_{stř,2,max}$	Střížná síla kruhového střížníku $\phi 45$ mm zvětšená o 20 %	[N]
$F_{stř,3,max}$	Střížná síla kruhového střížníku $\phi 8$ mm	[N]
$F_{stř,4}$	Střížná síla kruhového střížníku $\phi 4,1$ mm	[N]
$F_{stř,4,max}$	Střížná síla kruhového střížníku $\phi 4,1$ zvětšená o 20 %	[N]
$L_{45}$	Obvod kruhového střížníku $\phi 45$ mm	[mm]
$L_8$	Obvod kruhového střížníku $\phi 8$ mm	[mm]

$L_{4,1}$	Obvod kruhového střížníku $\phi 4,1$ mm	[mm]
$A_1$	Střížná práce obvodového střížníku	[J]
$A_2$	Střížná práce kruhového střížníku $\phi 45$ mm	[J]
$A_3$	Střížná práce kruhového střížníku $\phi 8$ mm	[J]
$A_4$	Střížná práce kruhového střížníku $\phi 4,1$ mm	[J]
$A_c$	Celková střížná práce	[J]
$I$	Kvadratický moment průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$S_o$	Plocha namáhaná na otláčení	[mm <sup>2</sup> ]
$F_{Lo}$	Lemovací síla na obvodový vypuklý lem	[N]
$F_{Lv}$	Lemovací síla na vnitřní lem otvoru	[N]
$F_{Lp}$	Lemovací síla na přímý lem	[N]
$F_{pr}$	Síla pro zhotovení uzavřeného prolisu	[N]
$S_{pr}$	Plocha průmětu prolisu	[mm <sup>2</sup> ]
$n$	Koeficient otupení apod.	[-]
$s$	Tloušťka plechu	[mm]
$h_s$	Hloubka vniku střížníku	[mm]
$u$	Střížná mezera	[mm]
$v$	Střížná vůle	[mm]
$c$	Součinitel střížné vůle	[-]
$x_s$	Souřadnice těžiště střížné síly v ose x	[mm]
$y_s$	Souřadnice těžiště střížné síly v ose y	[mm]
$x_{1..n}$	Obecná souřadnice těžiště n-tého obrazce v ose x	[mm]
$y_{1..n}$	Obecná souřadnice těžiště n-tého obrazce v ose y	[mm]
$z_z$	Koeficient ztenčení	[-]
$z_r$	Koeficient rozšíření prvotního průřezu	[-]
$\Delta s$	Ztenčení při ohýbání	[mm]
$l_o$	Rozvinutá délka ohybu	[mm]
$s_1$	Tloušťka plechu po ohnutí	[mm]
$h_{min}$	Minimální výška lemu	[mm]
$a_L$	Délka přímého lemu	[mm]
$b_L$	Šířka přímého lemu	[mm]
$p_L$	Lisovací/lemovací tlak na lem	[MPa]
$h$	Výška lemu	[mm]
$p_p$	Měrný tlak nepevného prostředí	[MPa]
$k_w$	Přetvárný odpor	[MPa]
$h_p$	Hloubka prolisu	[mm]
$d_{min}$	Minimální průměr otvoru	[mm]
$n_v$	Max. velikost výrobní série	[ks]
$n_{t,s}$	Potřebný počet tabulí	[mm]
$n_{3,t}$	Počet výstřížků z tabule varianta 3	[ks]
$m_{tab}$	Hmotnost tabulí	[kg]
$m_{vc}$	Hmotnost výstřížků	[kg]
$m_o$	Hmotnost odpadu	[kg]
$d_s$	Průměr střížníku	[mm]
$n_b$	Součinitel bezpečnosti	[-]
$d_4$	Průměr střížníku $\phi 4,1$	[mm]
$\sigma_1$	Tahové napětí v oblasti stříhu	[MPa]
$\sigma_3$	Tlakové napětí v oblasti stříhu	[MPa]
$\tau_{max}$	Maximální napětí ve smyku	[MPa]
$\sigma_n$	Normálová složka napětí	[MPa]



$\tau_s$	Mez pevnosti ve smyku	[MPa]
$\lambda$	Součinitel plnosti grafu	[-]
$\varepsilon$	Mezní prodloužení – vznik defektů	[-]
$\gamma$	Úhel ohnutého úseku	[°]
$\alpha$	Úhel ohybu	[°]
$\rho_{al}$	Hustota duralu	[kg.m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{DOV}$	Dovolené napětí v tlaku	[MPa]

## **SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE**

Výkres sestavení:

Střížný nástroj DP\_2019\_IR\_1

Výrobní výkresy:

Střížník DP\_2019\_IR\_1/1

Střížnice DP\_2019\_IR\_1/2

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Kapalinový lis Quintus QFC [53]

## Příloha 1

### Kapalinový lis Quintus QFC [53]



#### Types QFC 0.7x1.8-800



#### Fluid Cell Press Types QFC 0.7x1.8

Press data		QFC 0.7x1.8-800
Maximum operating pressure		800 bar / 11,600 psi
Press force		170 MN / 18,700 short tons
Total press length, including 2 tray stations		11 m / 36.1 ft
Total press length, including diaphragm exchange area		15 m / 49.2 ft
Total press width		2.3 m / 7.5 ft
Foundation depth		Placed at floor level
Total weight (on press foundation)		32,000 kg / 71,000 lbs
(The above dimensions include the hydraulic equipment)		
Tray data		
Number of tray stations		1 or 2
Maximum tray depth		175 mm / 6.9"
Tray depth with one filler plate		125 mm / 4.9"
Tray depth with two filler plates		95 mm / 3.7"
Usable tray area with filler plate		700 x 1,830 mm / 27.6" x 72.0"
Usable tray area at full depth		700 x 1,830 mm / 27.6" x 72.0"
Transportation data		
Gross weight of heaviest item		32,000 kg / 71,000 lbs
Gross dimensions of heaviest item (LxWxH)		4.0 x 2.5 x 3.0 m / 13 x 8.2 x 9.8 ft
Control system		
Programmable controller (PLC)		Allen-Bradley
HMI panel		Allen-Bradley
Flat color touch screen size		10.4"
Cycle time		
Cycle time at 95mm tray depth, to 70% of full pressure, with 50% tray loading		72 sec
Sound level		
Noise level at operator's station		<80 dB (A) equivalent
Site utilities – electric power		
Incoming current protection		160 A
Installed power		68 kW
Voltage (three-phase + ground)		380–480 V (± 5%)
Frequency		50/60 Hz



Aerospace parts made in aluminium alloys, stainless steel and titanium.



Automotive prototypes and parts produced in low volumes for niche vehicles.